

PRV

PATENT- OCH REGISTRERINGSVERKET
Patentavdelningen

REC'D 19 JAN 2004

WIPO

PCT

PCT/SE 03/01940

Intyg Certificate

Härmed intygas att bifogade kopior överensstämmer med de handlingar som ursprungligen ingivits till Patent- och registreringsverket i nedannämnda ansökan.

This is to certify that the annexed is a true copy of the documents as originally filed with the Patent- and Registration Office in connection with the following patent application.

(71) Sökande Arcam AB, Mölndal SE
Applicant (s)

(21) Patentansökningsnummer 0203767-9
Patent application number

(86) Ingivningsdatum 2002-12-19
Date of filing

Stockholm, 2003-12-18

För Patent- och registreringsverket
For the Patent- and Registration Office


Görel Gustafsson

Avgift
Fee

PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

PATENT- OCH
REGISTRERINGSVERKET
SWEDEN

Postadress/Adress
Box 5055
S-102 42 STOCKHOLM

Telefon/Phone
+46 8 782 25 00
Vx 08-782 25 00

Telex
17978
PATOREG S

Telefax
+46 8 666 02 86
08-666 02 86

TITEL

Anordning samt metod för framställande av en tredimensionell produkt.

TEKNISKT OMRÅDE

- 5 Uppfinningen avser en anordning och en metod för framställning av en tredimensionell produkt genom successiv sammansmältning av utvalda delar av på ett arbetsbord pålagda pulverlager.

TEKNIKENS STÅNDPUNKT

- 10 Genom exempelvis US 4863538 är förut känd en anordning för framställande av en tredimensionell produkt genom successiv sammansmältning av utvalda delar av på ett arbetsbord pålagda pulverlager. Anordningen innefattar ett arbetsbord på vilken nämnda tredimensionella produkt skall uppbyggas, en pulverdispenser vilken är anordnad att lägga ut ett tunt lager av pulver på
- 15 arbetsbordet för bildande av en pulverbädd, en strålskanon för avgivande av energi till pulvret varvid sammansmältning av pulvret sker, organ för styrning av den av strålskanonen avgivna strålen över nämnda pulverbädd för bildandet av ett tvärsnitt av nämnda tredimensionella produkt genom sammansmältning av delar av nämnda pulverbädd och en styrdator i vilken
- 20 information om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns lagrad. Genom sammansmältning av utvalda delar av successivt pålagda pulverlager byggs den tredimensionella produkten upp. Styrdatorn är ämnad att styra avläkningsorgan för den av strålskanonen genererade strålen över pulverbädden enligt ett körschema vilket avbildar ett förutbestämt mönster.
- 25 När körschemat sammansmält ett önskat område hos ett pulverlager har ett tvärsnitt hos nämnda tredimensionella kropp bildats. En tredimensionell produkt bildas genom successiv sammansmältning av successivt bildade tvärsnitt ur av pulverdispensern successivt pålagda pulverskikt.
- 30 Genom SE 0001557-8 är förut känt en anordning för framställande av en tredimensionell produkt där uppmätning av ytstrukturen och ytemperaturen hos den producerade tredimensionella kroppen medges under

TITEL

Anordning samt metod för framställande av en tredimensionell produkt.

TEKNISKT OMRÅDE

- 5 Uppfinningen avser en anordning och en metod för framställning av en tredimensionell produkt genom successiv sammansmältning av utvalda delar av på ett arbetsbord pålagda pulverlager.

TEKNIKENS STÄNDPUNKT

- 10 Genom exempelvis US 4863538 är förut känd en anordning för framställande av en tredimensionell produkt genom successiv sammansmältning av utvalda delar av på ett arbetsbord pålagda pulverlager. Anordningen innefattar ett arbetsbord på vilken nämnda tredimensionella produkt skall uppbyggas, en pulverdispenser vilken är anordnad att lägga ut ett tunt lager av pulver på
- 15 arbetsbordet för bildande av en pulverbädd, en strålskanon för avgivande av energi till pulvret varvid sammansmältning av pulvret sker, organ för styrning av den av strålskanonen avgivna strålen över nämnda pulverbädd för bildandet av ett tvärsnitt av nämnda tredimensionella produkt genom sammansmältning av delar av nämnda pulverbädd och en styrdator i vilken
- 20 information om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns lagrad. Genom sammansmältning av utvalda delar av successivt pålagda pulverlager byggs den tredimensionella produkten upp. Styrdatorn är ämnad att styra avlänkingsorgan för den av strålskanonen genererade strålen över pulverbädden enligt ett körschema vilket avbildar ett förutbestämt mönster.
- 25 När körschemat sammansmält ett önskat område hos ett pulverlager har ett tvärsnitt hos nämnda tredimensionella kropp bildats. En tredimensionell produkt bildas genom successiv sammansmältning av successivt bildade tvärsnitt ur av pulverdispensern successivt pålagda pulverskikt.
- 30 Genom SE 0001557-8 är förut känt en anordning för framställande av en tredimensionell produkt där uppmätning av ytstrukturen och ytemperaturen hos den producerade tredimensionella kroppen medges under

tillverkningsförfarandet. Genom att nyttja den däri beskrivna anordningen möjliggörs ökad överensstämmelse av formen hos de producerade tredimensionella kropparna i förhållande till avsedd form. I

- 5 tillverkningsprocessen av de tredimensionella produkterna har det dock visat sig att ytspänningar hos den tillverkade produkten kan ge upphov till formavvikelse samt inre spänningar i produkten vilka kan ge upphov till initiering av sprickbildning.

KORT BESKRIVNING AV UPPFINNINGEN

10

Ett ändamål med uppfinningen är att tillhandahålla en metod för framställning av tredimensionella kroppar där reduktion inducerade formavvikelse samt förekomsten av inre spänningar i slutprodukten möjliggörs. Detta ändamål uppnås genom en anordning enligt den kännetecknande delen av

- 15 patentkravet 1.

- Enligt metoden indelas det mot ett tvärsnitt hos den tredimensionella kroppen motsvarande utvalda området hos en pulverbädd i ett eller flera inre områden vilka var och en uppvisar en rand. Det inre området sammansmälts under ett
- 20 rörelsemönster för fokuspunkten hos strålkänslans stråle, vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komponent i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen. Störtermen uppvisar ett tidsmedelvärde motsvarande en nollavdrift från den huvudsakliga rörelseriktningen. Den
- 25 huvudsakliga rörelseriktningen uppvisar en propageringshastighet vilken företrädesvis motsvarar utbredningshastigheten för en smältzon hos ett bearbetat material. Den huvudsakliga rörelseriktningen kan uppvisa valfri kurvform, exempelvis rätlinjig, bågformad, cirkelformad. Utseendet på den huvudsakliga rörelseriktningen är anpassad till formen på det objekt som
- 30 skall skapas. Störtermen är dock inte anpassad till formen på objektet utan utformas för att tillhandahålla en gynnsammare lokal värmefördelning vid ett område kring fokuspunkten. Genom strålens rörelsemönster tillses sålunda att

strålskanonens energi tillförs med en jämnare intensitet till pulverlagret, varvid risken för överhettning reduceras. Detta minskar i sin tur risken för uppkoms av formavvikelse och spänningar i slutprodukten. Randen sammansmälts enligt en föredragen utföringsform under en huvudsakligen rätlinjig rörelse, vilken följer randens form, hos strålskanonens stråle. Genom att randen sammansmälts under en rörelse som följer randens form tillses att den färdigbildade kroppens mantelyta blir slät.

Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen beräknas en energijämnvikt för varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida inmatad energi till pulverlagret vid nämnda tillförande av energi från en strålskanon enligt ett för pulverlagret fastställt körschema för sammansmältning av det enligt nämnda körschema utvalda område av pulverlagret är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos nästkommande lager. Genom jämnviktsberäkningen inhämtas information som möjliggör upprätthållande av en bestämd arbetstemperatur. Genom att upprätthålla en bestämd arbetstemperatur, dvs en ytemperatur inom ett givet bestämt temperaturintervall under produktionen av samtliga lager tillses att förekomsten ytspänningar som uppkommer vid för stark nedkylning av den tredimensionella kroppen reduceras. Detta medför i sin tur att slutprodukten uppvisar en reducerad förekomst av formavvikelse samt en reducerad förekomst av inre spänningar i slutprodukten.

Ett andra ändamål med uppfinningen är att tillhandahålla en anordning för framställning av tredimensionella kroppar där reduktion av förekomsten av ytspänningar och därigenom inducerade formavvikelse samt förekomsten av inre spänningar i slutprodukten möjliggörs. Detta ändamål uppnås genom en anordning enligt den kännetecknande delen av patentkravet 5.

I en föredragen utföringsform av uppfinningen är den i anordningen ingående styrdatorn anordnad att beräkna en energijämnvikt för varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida inmatad energi till

- pulverlagret vid nämnda tillförande av energi från en strålskanon enligt ett för pulverlagret fastställt körschema för sammansmältning av det enligt nämnda körschema utvalda område av pulverlagret är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos nästkommande lager. Genom beräkningen
- 5 inhämtas information som möjliggör upprätthållande av en bestämd arbetstemperatur. Genom att upprätthålla en bestämd arbetstemperatur, dvs en yttemperatur inom ett givet bestämt temperaturintervall under produktionen av samtliga lager tillses att förekomsten ytspänningar som uppkommer vid för stark nedkylning av den tredimensionella kroppen
- 10 reduceras. Detta medför i sin tur att slutprodukten uppvisar en reducerad förekomst av formavvikelse samt en reducerad förekomst av inre spänningar i slutprodukten.

FIGURBESKRIVNING

- 15 Uppfinningen kommer nedan att närmare beskrivas i anslutning till bifogade ritningsfigurer, där:

fig. 1 visar en genomskärning av en anordning enligt uppfinningen,

- 20 fig. 2 visar ett område som skall sammansmältas vilket uppvisar ett inre område och en rand,

fig. 3 visar en uppsättning skilda kurvformer med en endimensionell störterm,

- 25 fig. 4 visar schematiskt hur värmefördelningen ser ut i en kropp där en strålskanons fokuspunkt med diametern D uppvärmt kroppen, dels i närvaro av en störterm, dels i frånvaro av en störterm,

- 30 fig. 5 visar ett exempel på fokuspunktens rörelse i förhållande till förflyttning av fokuspunkten längs den huvudsakliga rörelseriktningen,

- fig. 6 visar en uppsättning skilda kurvformer med en tvådimensionell störterm,
- 5 fig. 7 visar rörelsemönstret för en fokalpunkt enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen,
- fig. 8 visar fokalpunkternas placering samt ett utvidgat område inom vilket sammansmältning sker,
- 10 fig. 9 visar en vidare indelning av det område som skall sammansmältas i en uppsättning avskilda områden, var och en uppvisande inre områden och ränder,
- 15 fig. 9a visar ytterligare en indelning av det område som skall sammansmältas i en uppsättning avskilda områden, var och en uppvisande inre områden och ränder,
- 20 fig. 10 visar schematiskt en genomskärning av en tredimensionell kropp bildad av ett antal pulverlager samt ett översta pulverlager,
- fig. 11 visar en principmodell för beräkning av energijämnvikt,
- 25 fig. 12 visar en andra principmodell för beräkning av energijämnvikt,
- fig. 13 visar ett urvalt område vilket är indelat i en uppsättning avskilda områden ,
- 30 fig. 14 visar en vy från sidan av en kammare försedd med ett genomsynligt fönster,

- fig. 15 visar en anordning för frammatning och fixering av en skyddsfilm för bibehållande av genomsynlighet hos fönstret,
- fig. 16 visar ett flödesschema för generering av primärkörscheman,
- 5 fig. 17 visar ett flödesdiagram för ett körschema hos anordningen,
- fig. 18 visar ett flödesdiagram för korrigering av nämnda körschema,
- 10 fig. 19 visar schematiskt ett förfarande innefattande korrigering av körscheman med hjälp av information inhämtad från en kamera vilken uppmäter temperaturfördelningen över pulverbäddens yta,
- fig. 20 visar schematiskt ett förfarande för korrigering av körscheman,
- 15 fig. 21 visar en schematisk uppbyggnad av ett tredimensionellt föremål och
- fig. 22 visar ett antal tvärsnitt ur figur 21.

20

UTFÖRINGSEXEMPEL

- I figur 1 visas en anordning för framställande av en tredimensionell produkt generellt betecknad med 1. Anordningen innefattar ett arbetsbord 2 på vilken en tredimensionell produkt 3 skall uppbyggas, en eller flera pulverdispensrar 4 samt organ 28 vilka är anordnade att lägga ut ett tunt lager av pulver på arbetsbordet 2 för bildande av en pulverbädd 5, en strålskanon 6 för avgivande av energi till pulverbädden varvid sammansmältning av delar av
- 25 pulverbädden sker, organ för styrning 7 av den av strålskanonen 6 avgivna strålen över nämnda arbetsbord för bildandet av ett tvärsnitt av nämnda tredimensionella produkt genom sammansmältning av nämnda pulver och en
- 30

- styr dator 8 i vilken information om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns lagrad, vilka tvärsnitt bygger upp den tredimensionella produkten. Vid en arbetscykel kommer, enligt den visade föredragna utföringsformen, arbetsbordet att successivt sänkas i förhållande
- 5 till strålskanonen efter varje pålagt pulverlager. För att möjliggöra denna förflyttning är i en föredragen utföringsform av uppfinningen arbetsbordet förflyttbart anordnat i vertikalled, dvs i den riktning som indikeras av pilen P. Detta innebär att arbetsbordet startar i ett utgångsläge 2 i ett läge där ett första pulverlager av nödvändig tjocklek pålagts. För att inte skada det
- 10 underliggande arbetsbordet och för att tillhandahålla tillräcklig kvalitet på detta lager gör detta lager tjockare än övriga pålagda lager, varvid genomsmältning av detta första lager undviks. Därefter sänks arbetsbordet i anslutning till att ett nytt pulverlager utläggs för bildandet av ett nytt tvärsnitt av den tredimensionella produkten. För detta ändamål är i en utföringsform
- 15 av uppfinningen arbetsbordet uppburet av en ställning 9 vilken innefattar åtminstone en kulskruv 10, försedd med tandning 11. En steg- eller servomotor 12 försedd med ett kugghjul 13 ställer in arbetsbordet 2 i önskat höjdläge. Även andra för fackmannen kända anordningar för inställning av arbetshöjd på ett arbetsbord kan nyttjas. Exempelvis kan ställskruvar
- 20 utnyttjas i stället för kuggstänger. Enligt en alternativ utföringsform av uppfinningen kan i anordningen ingående organ för pulverutläggning successivt höjas, i stället för att såsom i den ovan beskrivna utföringsformen sänka arbetsbordet.
- 25 Organet 28 är anordnat att samverka med nämnda pulverdispensrar för påfyllnad av material. Vidare drivs organets 28 svep över arbetsytan på känt sätt med en servomotor (icke visad), vilken förflyttar organet 28 längs en guideskena 29 vilken löper längs pulverbädden.
- 30 Vid påläggning av ett nytt pulverskikt, kommer tjockleken av pulverskiktet att bestämmas av hur mycket arbetsbordet sänkts i förhållande till förra lagret. Detta innebär att lagertjockleken kan varieras efter önskemål. Det är därför

möjligt att i då ett tvärsnitt uppvisar stor formförändring mellan näraliggande lager att göra tunnare lager varvid en högre ytfinhet uppnås och då liten eller ingen formförändring förekommer göra lager med för strålen maximal genomträngningstjocklek.

5

I en föredragen utföringsform av uppfinningen utgörs strålskanonen 6 av en elektronkanon varvid organen för styrning 7 av strålskanonens stråle utgörs av avlänkningsspolar 7". Avlänkningsspolen 7" alstrar ett magnetfält vilket styr den av elektronkanonen alstrade strålen varvid smältning av ytlagret hos pulverbädden på önskat ställe kan åstadkommas. Vidare innefattar strålskanonen en högspänningskrets 20 vilken är avsedd att på känt sätt förse strålskanonen med en accelerationsspänning för från en hos strålskanonen anordnad emitterelektrod 21. Emmitterelektroden är på känt sätt ansluten till en strömkälla 22 vilken nyttjas till att upphetta emitterelektroden 21 varvid elektroner friges. Strålskanonens funktion och komposition är välkänd för en fackman på området.

Avlänkningsspolen styrs av styrdatorn 8 enligt ett utlagt körschema för varje lager som skall sammansmältas varvid styrning av strålen enligt önskat körschema kan åstadkommas. Detaljer hos körschemats utseende enligt uppfinningen beskrivs nedan i anslutning till beskrivning av figurerna 2- 9.

Vidare finns åtminstone en fokusspole 7' vilken är anordnad att fokusera strålen på pulverbäddens yta på arbetsbordet. Avlänkningsspolar 7" och fokusspolar 7' kan anordnas enligt ett flertal för fackmannen välkända alternativ.

Anordningen är innesluten i ett hölje 15 som innesluter strålskanon 6 och pulverbädd 2. Höljet 15 innefattar en första kammare 23 vilken omsluter pulverbädden och en andra kammare 24 vilken omsluter strålskanonen 6. Den första kammaren 23 och den andra kammaren 24 kommunicerar med varandra via en kanal 25, vilken medger att emitterade elektroner, vilka

accelererats i högspänningsfältet i den andra kammaren kan fortsätta in i den första kammaren för att senare träffa pulverbädden på arbetsbordet 2.

I en föredragen utföringsform är den första kammaren är ansluten till en
5 vakuumpump 26 vilken sänker trycket i den första kammaren 23 till ett tryck av företrädesvis $ca. 10^{-3} - 10^{-5}$ mBar. Den andra kammaren 24 är företrädesvis ansluten till en vakuumpump 27 vilken sänker trycket i den andra kammaren 24 till ett tryck av $ca. 10^{-4} - 10^{-6}$ mBar. I en alternativ
10 utföringsform kan både den första och den andra kamrarna vara anslutna till samma vakuumpump.

Styrdatorn 8 är vidare företrädesvis ansluten till strålskanonen 6 för reglering av avgiven effekt hos strålskanonen samt ansluten till stegmotorn 12 för
15 inställning av arbetsbordets höjdläge 2 mellan varje konsekutiv påläggning av pulverlager, varvid pulverlagrens individuella tjocklek kan varieras.

Vidare är styrdatorn ansluten till nämnda organ 28 för pulverutläggning på arbetsytan. Detta organ är anordnat att svepa över arbetsytan varvid ett lager
20 pulver utlägges. Organet 28 drivs av en servomotor (icke visad) vilken styrs av nämnda styrdator 8. Styrdators styr svepets längs samt tillser att pulver påfylls vid behov. För den skull kan lastgivare vara anordnade i organet 28 varvid styrdatorn kan inhämta information om att organet är tomt eller har fastnat.

25 Styrdatorn 8 är vidare enligt en föredragen utföringsform uppfinningen anordnad att beräkna en energijämnvikt för det utvalda området som skall bearbetas inom varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida instrålad energi till det utvalda området från det utvalda områdets omgivning är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos det utvalda
30 området.

- Enligt uppfinningen är körschemat så utformat att det område som skall sammansmältas, dvs det utvalda området, indelas i ett eller flera inre områden I, var och en uppvisande en rand R. I figur 2 visas schematiskt ett område 35 som skall sammansmältas. Området innefattar ett inre område I vilket avgränsas av en rand R. Enligt uppfinningen sammansmälts det inre området I med ett rörelsemönster för fokalpunkten hos strålskanonens stråle, vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen. Störtermen växlar riktning och uppvisar ett tidsmedelvärde motsvarande en nollavdrift från den huvudsakliga rörelseriktningen. I figur 3 visas tre olika exempel på olika utseenden på störtermen vilka ger upphov till en rörelse i form av en trekantsvåg, en sinusformad kurva och en fyrkantsvåg.
- 15 I figur 4 visas schematiskt hur värmefördelningen ser ut i en kropp där en strålskanons fokalpunkt med diametern D uppvärmt kroppen. Temperaturfördelningen kring fokalpunkten har formen av en Gaussklocka. Temperaturfördelningen kring en fokalpunkt utan störterm visas med kurvan markerad (α) Genom störtermen breddas det spår som bearbetas under strålens propagering längs den huvudsakliga rörelseriktningen. Ett breddat spår visas med kurvan indikerad med (β). Det breddade spåret har även en temperaturfördelning med lägre maxvärde. Detta reducerar risken för uppkomst av överhettning med bildande av ojämnheter som följd.
- 20 Störtermen är företrädesvis av sådan art att en smältzon bildas, vilken uppvisar en bredd huvudsakligen motsvarande dubbla amplituden hos störtermens komposant i riktning vinkelrätt mot den huvudsakliga rörelseriktningen. Medelhastigheten av absolutbeloppet av fokalpunktens rörelse i störtermens riktning skall företrädesvis överstiga hastigheten för värmeutbredningen i materialet. Hastigheten i den huvudsakliga rörelseriktningen motsvarar företrädesvis hastigheten för värmeutbredningen i materialet. Amplituden och frekvensen hos störtermen skall företrädesvis

avpassas så att fokalpunkten hinner röra sig från sitt utgångsläge där störtermen har värdet noll, passera min och maxvärdet för störtermen och återta sitt läge tills det under den tid värmeutbredningens vågfront rör sig från första nollläget till det andra nollläget. Detta visas schematiskt i figur 5. I figur 5 visas hur fokalpunkten rör sig längs kurvan 50 från en första position 51, förbi ett maxima 52 hos störtermen, ett minima 53 hos störtermen för att därefter anta en andra position 54 med ett nollvärde på störtermen. Under denna tid har värmeutbredningens vågfront propagerat från den första positionen 51 fram till den andra positionen. I det fall att störtermens medelhastighet är för låg bildas i stället för ett brett spår ett kurvformat smält spår vilket löper inom den bana som definieras av störtermens ändpunkter.

Enligt en föredragen utföringsform uppvisar störtermen även en komposant i en riktning parallell med den huvudsakliga rörelseriktningen. Störtermen är i detta fall tvådimensionell. Exempel på störterm med tvådimensionell riktning ges i figur 6.

Randen R sammansmälts företrädesvis under en huvudsakligen rätlinjig rörelse hos strålskanonens stråle.

20

Syftet med att köra med ett rörelsemönster för fokalpunkten hos strålskanonens stråle, vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen är att man med bredare spår kan förflytta smältzonen långsammare men ändå smälta med en relativt hög hastighet jämfört med konventionell körning. En långsam förflyttning av smältzonen ger mindre förångning och mindre förekomst av att smält material kokar och stänker. Syftet med att randen sammansmälts med en kontinuerlig huvudsakligen rätlinjig rörelse är att detta ger en slät ytstruktur för den färdiga produkten.

25
30

Nedan följer en analys av rörelsemönstret för strålkanonens stråle vid en föredragen utföringsform av uppfinningen med en tvådimensionell störterm vilket ger upphov till ett spirallikande rörelsemönster för fokalpunkten.

- 5 Läget för en fokalpunkt som roterar kring x-axeln och som rör sig längs samma axel med hastigheten V_x kan fås ur:

$$\vec{r}(t) = (V_x t + A_x \cos(\omega t))\vec{x} + A_y \sin(\omega t)\vec{y} \quad \text{Ekv. 1}$$

- 10 där A_x och A_y är amplituderna i x- respektive y-led.
En typiskt "spinnkurva" kan se ut enligt vad som visas i figur 4:

Det i figur 7 visade mönstret fås om ω sätts till:

$$15 \quad \omega = \frac{2\pi V_x}{A_x} \quad \text{Ekv. 2}$$

Fokalpunktens hastighet ges av:

$$\frac{d\vec{r}(t)}{dt} = (V_x - A_x \omega \sin(\omega t))\vec{x} + A_y \omega \cos(\omega t)\vec{y} \quad \text{Ekv. 3}$$

- 20 Dess absoluthastighet är således:

$$\left| \frac{d\vec{r}(t)}{dt} \right| = \sqrt{(V_x - A_x \omega \sin(\omega t))^2 + (A_y \omega \cos(\omega t))^2} \quad \text{Ekv. 4}$$

- 25 Om fokalpunkten rör sig enligt formlerna ovan så kommer dess hastighet att variera och vara som störst antingen på undersidan av x-axeln och minst på ovansidan eller tvärtom beroende på rotationsriktningen. För att få en fokalpunkt som rör sig med konstant hastighet längs spinnkurvan i Figur 1 beräknas först dess medelhastighet:

$$V_{medel} = \frac{\int_0^T \left| \frac{dr(t)}{dt} \right| dt}{T}$$

Ekv. 5

Där :

5

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

V_{medel} är hastigheten som fokalpunkten ska förflytta sig med. Vid tiden t har fokalpunkten förflyttat sig sträckan:

10

$$s = t * V_{medel}$$

Denna sträcka måste vara lika med spinnkurvanslängd vid tiden t' . Alltså:

15

$$s = t * V_{medel} = \int_0^{t'} \left| \frac{dr(t)}{dt} \right| dt$$

Ekv. 6

Genom att lösa ekv. 6 för $0 < t < T$ fås t' som funktion av t . t' används sedan i Ekv. 1 vilket ger spottens läge som funktion av tiden t .

20

Ett flertal simuleringar med olika hastigheter och A_y har visat att smältzonen 0.1-0.15 mm under ytan har en ungefärlig bredd av $1.8A_y$. Hoppet mellan två spinlinjer bör då vara:

25 $Hopp_{spin} = 1.8A_y - 0.3$

Avståndet till starten från en kant blir ungefär:

$$\text{Starthopp} = 0.8A_y - 0.15$$

I figur 8 visas att en sammanhängande bred smält rand vilken propagerar i riktningen x markerad med en pil i diagrammet. Fokalpunkterna med en diameter D är markerade i diagrammet. Det överlappande mönstret ser till att sammansmältning sker inom ett område utanför fokalpunkten. Ett sådant område är utritat och markerat med symbolen δ . Sammantaget bildar dessa områden en heltäckande area vilken propagerar i riktningen markerad med pilen x.

10

I figur 9 visas schematiskt ett område 35 som skall sammansmältas. Detta område är indelat i ett flertal delområden 80 – 91, vilka var och en uppvisar ett inre område och en rand.

Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen utformas körschemat så att det inre området I hos en uppsättning angränsande delområden inom sammansmälts under ett rörelsemönster för fokalpunkten hos strålkanonens stråle, vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen. Företrädesvis sammansmälts åtminstone den rand som bildar en inre eller yttre mantelyta hos den färdiga kroppen under en rörelse vilken följer randen utan tillägg av störterm. Enligt en utföringsform av uppfinningen sammansmälts de inre områdena I i ett första processteg varefter ränderna sammanfogar de inre områdena i ett efterföljande processteg. Genom detta förfarande minskas förekomsten av böjspänningar i den tredimensionella kroppen efter avsvälning. I en alternativ utföringsform kan ränderna sammansmältas i ett första processteg och de inre områdena i ett efterföljande processteg. Detta kan vara fördelaktigt när mycket tunna pulverlager utläggs varvid en solid mantelyta skapas, eventuellt med ett antal inre stadgande skott. De inre områdena kan därefter sammansmältas i ett senare processteg där flera pulverlager sammansmälts i ett gemensamt svep med strålkanonens över



flera lager. Detta medför att de inre områdena blir lätt sintrade, vilket kan vara fördelaktigt för vissa produkter.

- 5 Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen är styrdatorn vidare anordnad att beräkna en energijämnvikt för åtminstone det utvalda området som skall sammansmältas inom varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida instrålad energi till det utvalda området från det utvalda områdets omgivning är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området.

10

Syftet med att beräkna energijämnvikten för pulverlagren är att beräkna effekten som behövs för att hålla objektets yta vid en given temperatur. Effekten antas vara konstant över hela ytan.

- 15 Nedan beskrivs hur jämnviktsberäkningen utförs i en utföringsform av uppfinningen där beräkningen utförs för ett lager i taget

För att kunna beräkna effekten i realtid krävs förenklingar:

- 20
1. Vi tänker oss att temperaturen är konstant i x och y-led och att den varierar enbart i z led, m.a.o. hela ytan har samma temperatur.
 2. Temperaturen i z-led varierar med jL_f . Där j är lagernumret och L_f är lagertjockleken.
 3. Temperaturfördelningen under smältning anses vara stationär.

25

Följande parametrar påverkar beräkningen:

Olika index:

i = index för översta lagret

- 30 j = lager index går från 1 till i

Objektdata:

L_t = lagertjockleken som ska smältas [m]

$L_{cont}(j)$ = konturlängden för lager j [m]

$A_{pow}(z) = A_{pow}(j)$ = arean ut mot pulvret för lager j . [m]

$A(z) = A(j)$ total ytan som har smältas för lager j [m²]

5

Materialegenskaper:

λ_{met} = materialets värmeledningsförmåga [W/mK]

σ_{met} = strålningskonstanten för metallytan [W/m²K]

σ_{metpow} = strålningskonstanten för metallyta täckt med pulver [W/m²K]

10 σ_{pow} = strålningskonstanten för pulverytan [W/m²K]

λ_{pow} = pulvrets värmeledningsförmåga [W/mK]

$h_{pow}(z)$ = värmeöverföringstalet från objektet ut mot pulvret [W/m²K]

α = andelen av stråleffekten som tas upp av materialet

15

Temperaturer [K]:

$T_{sur}(i)$ = omgivningens temperatur som ytan känner när lager i smälts (Kan mätas på kepsen)

$T_{pow}(z)$ = temperaturen i pulvret

20 $T(z)$ = temperaturen i objektet

$T_{surf}(i) = T(iL_t)$ = önskad temperaturen på ytan av objektet när lager i smälts. (Sätts i AMA)

$T_{bott}(i)$ = temperaturen i botten på objektet innan lager i påbörjas (Mäts precis innan rakning eller beräknas. Se nedan)

25

För att bestämma hur temperaturen fördelar sig i objektet löser vi den endimensionella stationära värmeledningsekvationen inkluderande en källterm som tar hänsyn till värmeförluster ut i pulvret:

30
$$-\lambda_{mat} \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} = \frac{h_{pow}(z) A_{pow}(z)}{A(z) L_t} (T_{pow}(z) - T(z))$$

Randvillkoren på ytan och i botten är:

$$-\lambda_{met} \frac{\partial T(z)}{\partial z} \Big|_{z=iLt} = \frac{(\sigma_{met} + \sigma_{pow})}{2} (T(iLt)^4 - T_{sur}(i)^4) - \frac{P_{in}}{A(iLt)}$$

$$-\lambda_{met} \frac{\partial T(z)}{\partial z} \Big|_{z=0} = h_{pow} (T_{bott}(i) - T(0))$$

5 Där A och B är två konstanter.

Skriver om formlerna som differensformler i stället och låter j vara indexet för varje lager.

$$-\lambda_{met} \frac{T(j+2) - 2T(j+1) + T(j)}{Lt^2} = \frac{h_{pow}(j) A_{pow}(j)}{A(j) Lt} (T_{pow}(j) - T(j))$$

$$-\frac{\lambda_{met}}{Lt} (T(i) - T(i-1)) = \frac{(\sigma_{met} + \sigma_{pow})}{2} (T(i)^4 - T_{sur}(i)^4) - \frac{P_{in}}{A(i)}$$

$$-\frac{\lambda_{met}}{Lt} (T(2) - T(1)) = h_{pow} (T_{bott}(i) - T(1))$$

10

där

$$1 \leq j \leq i-2$$

15 Randvillkoret på ytan ger oss egentligen inget nytt vad det gäller temperaturfördelningen i objektet eftersom ytans temperatur bestäms av $T(i)$. Men det behövs för att bestämma P_{in} som är effekten som krävs för att hålla temperaturen på ytan vid $T(i)$. $T(j)$ fås nu ur följande ekvationssystem:

$$\Delta(j) = -\frac{h_{pow}(j) A_{pow}(j) Lt}{A(j) \lambda_{met}}$$

20 $T(j+2) - 2T(j+1) + T(j)(1 + \Delta(j)) = \Delta(j) T_{pow}(j)$

$$T(1) = T_{bott}(i) \frac{h_{pow}(1) Lt / \lambda_{met}}{(1 + h_{pow}(1) Lt / \lambda_{met})} + T(2) \frac{1}{(1 + h_{pow}(1) Lt / \lambda_{met})}$$

Sätter in yttrycket för $T(1)$ och formulerar problemet som ett linjärt ekvationssystem:

$$5 \quad 1. \quad T(3) - 2T(2) + T(2) \frac{(1 + \Delta(1))}{(1 + h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met})} = \Delta(1)T_{pow}(1) - T_{bott}(i) \frac{h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met}}{(1 + h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met})} (1 +$$

$$2. \quad T(4) - 2T(3) + T(2)(1 + \Delta(2)) = \Delta(2)T_{pow}(2)$$

$$i-2. \quad -2T(i-1) + T(i-2)(1 + \Delta(i-2)) = \Delta(i-2)T_{pow}(i-2) - T(i)$$

10

På matrisform blir det:

$$Ax = b$$

där då:

15

$$A_{jk} = \delta(j+1-k) - 2\delta(j-k) + \delta(j-1-k)(1 + \Delta(j)) + \delta(1-k)\delta(1-j) \frac{(1 + \Delta(1))}{(1 + h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met})}$$

$$x_1 = T(2), \dots, x_{i-2} = T(i-1)$$

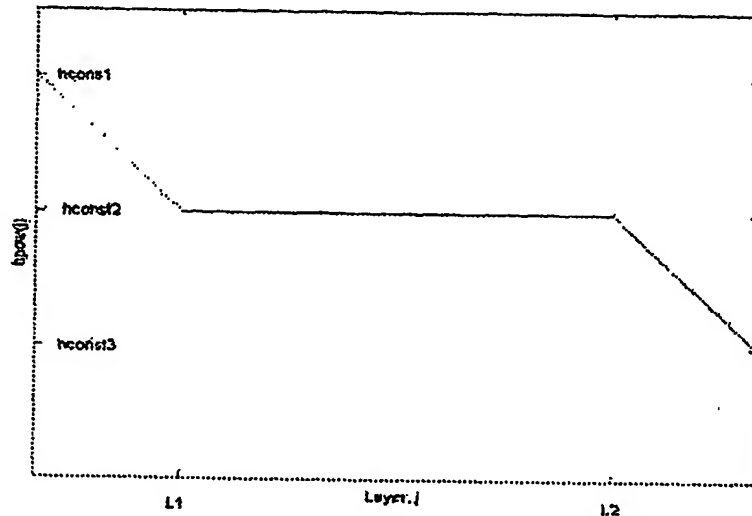
$$b_j = \Delta(j)T_{pow}(j) - \delta(j-1)T_{bott}(i) \frac{h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met}}{(1 + h_{pow}(1)Lt/\lambda_{met})} (1 + \Delta(1)) - \delta(j-i+2)T(i)$$

20 För att kunna lösa ekvationerna krävs det att pulvrets temperatur, $T_{pow}(j)$, och värmeöverföringstalet, $h_{pow}(j)$, är kända. I programmet är $T_{pow}(z)$ satt till:

$$T_{pow}(j) = AT(j)_{i-1} + BT_{sur}(i-1)$$

i-1 betyder att temperaturen för det föregående lagret används för att bestämma $T_{pow}(j)$.

Funktionen som används för $h_{pow}(j)$ ser ut på följande sätt:



5

Värden L1 och L2 har antagits vara areaoberoende medan hconst1, hconst2 och hconst3 antas bero på $A(j)$. Alla konstanterna i uttrycken för både T_{pow} och h_{pow} har fått fram genom att anpassa 1 D modellen ovan mot en 3D FEM beräkningar på objekt med enkla geometrier.

10

I uttrycket för källtermen ingår $A_{pow}(j)$ som egentligen är den totala arean ut mot pulvret för varje lager. Vi stora areaövergångar kan detta värde bli rätt stort vilket medför att värdet på källtermen gör ett hopp. Sådana diskreta skutt medför att lösningen blir instabil. För att förhindra detta sätts enligt en förordagen utföringsform $A_{pow}(j)$ till $Lcont(j) * L_t$. Effektförluster som uppstår genom en areaövergång läggs istället till i efterhand. Storleken på effektförlusten beror på hur stor över respektive underarean är och hur långt under topplagret som areaövergången är belägen. Värden för olika areaövergångar och olika djup har fått fram genom 3D FEM simuleringar.

15

20

För en godtycklig areaövergång fås effekttillägget genom interpolering.

- Innan effekten beräknas läser programmet in de olika värden för $Lcont(j) \cdot Lt$ och $A(j)$ för varje lager. Med hjälp av en scriptfil kan man påverka dessa på olika sätt. På så sätt kan man styra effekten för varje lager. Hur man påverkar de olika geometri parametrarna framgår av beskrivningen över hur scriptfilen fungerar.

- 10 När ekvationssystemet ovan är löst fås den totala effekten som krävs för att hålla ytan vid $T_{surf}(i)$ ur randvillkoret för ytan:

$$P_{in} = A(i) \left(\frac{\lambda_{met}}{Lt} (T(i) - T(i-1)) + \frac{(\sigma_{met} + \sigma_{pow})}{2} (T(i)^4 - T_{sur}(i)^4) \right)$$

- 15 När ett lager smälts används olika ström och hastighet över ytan. För att kunna beräkna de olika strömmarna som krävs sätts medelvärdet av alla effekter som används lika med P_{in} .

Om ett lager ska smältas med n_i olika strömmar gäller:

$$P_{in} = \alpha U \frac{\sum_{k=1}^{k=n_i} I_{ik} t_{ik}}{T_{tot}}$$

$$t_{ik} = \frac{l_{ik}}{v_{ik}}$$

$$T_{tot} = \sum_{k=1}^{k=n_i} t_{ik}$$

20

Där t_{ik} är smälttiden för varje ström I_{ik}

l_{ik} är smältlängden

v_{ik} är smälthastigheten

T_{tot} är den totala smälttiden för lagret i .

- 25 U är accelerationsspänningen.

För att kunna beräkna strömmarna måste man alltså veta hastigheterna. Dessa erhålls ur så kallade *speedfunctions* som anger förhållandet mellan ström och hastigheten. Eftersom dessa funktioner inte är analytiska måste ett
5 iterativt förfarande användas för att bestämma alla strömmar och hastigheter. I beräkningsprogrammet gissas varje startvärde på I_{ik} . Därefter hämtas de olika hastigheterna. Värdena på strömmarna ökas sedan på tills medelvärdet av effekten precis överstiger det beräknade värdet på P_{in} .

10 Antag nu att vi vill smälta de olika delareorna med en sådan hastighet och ström att energin som avges till materialet blir mindre än den som krävs för att hålla ytan vid $T_{surf}(i)$. Ytan måste då värmas upp. Antalet gånger som behövs för att värma upp ytan fås genom att i uttrycket för medelvärdet på
15 effekten lägga till en uppvärmningsterm:

$$P_i^{heat} = \frac{n\alpha U I_i^{heat} I_i^{heat}}{v_i^{heat}}$$

och i uttrycket för tiden T_{tot} lägga till uppvärmningstiden:

$$t_i^{heat} = \frac{m_i^{heat}}{v_i^{heat}}$$

20

där n anger hur många gånger som ytan måste värmas upp.

Ovan redovisade beräkningsrutin kan nyttjas för hela pulverlagret. I en alternativ utföringsform kan beräkningen ske för olika delareor av
25 pulverlagret.. Även i detta fall kan de ovan angivna ekvationerna nyttjas. Dock erhålles andra randvillkor för de inre ränder som ligger an mot en smält kropp.

I figur 10 visas en sidovy av en sammansmält kropp 30 vilken är uppbyggd genom sammansmältning av delområden 31 - 34 i konsekutiva pulverlager i - 1, i - 2, i - 3, i - 4. Givetvis kan en verklig kropp tillverkad enligt uppfinningen innefatta långt fler lager än vad som angivits i detta exempel.

5 På kroppen är ett översta pulverlager i utlagt. Inom detta översta pulverlager är ett urvalt område 35 beläget. Det utvalda området 35 utgörs av det område som enligt ett körschema skall sammansmältas. Det utvalda området 35 inom lagret i begränsas av en yttre rand 36. Det är givetvis tänkbart att ett urvalt område innefattar såväl yttre som inre ränder. Jämnviktsberäkningen

10 skall utföras på hela det utvalda området 35. Företrädesvis är det utvalda området 35 indelat i en mängd mindre delområden såsom visas i figur 9 varvid separata beräkningar kan utföras för delområdena. Inom det utvalda området 35 är ett delområde 37 visat för vilket en energijämnvikt skall beräknas. Det delområdet 37 kan utgöras av en del av det utvalda området

15 såsom visats i figur 5 alternativt utgöras av hela det utvalda området.

I figur 9a visas ett utvalt område 35 vilket är indelat i en mängd mindre delområden. Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen är ytan inom varje pulverlager indelad i en uppsättning avskilda områden 38 - 53, varvid

20 en energijämnvikt beräknas för var och en av nämnda uppsättning avskilda områden 38 - 53, vilka innefattar någon del av det utvalda området 35. Det utvalda området begränsas av en yttre rand 72. Givetvis kan det utvalda området även innefatta inre ränder.

25 Enligt en ytterligare föredagen utföringsform av uppfinningen innefattar nämnda uppsättning avskilda områden 38 - 53 en första grupp områden 54 - 58 vars ränder ligger helt inom utvalda område 35 samt en andra grupp områden 38 - 53 vars ränder åtminstone delvis sammanfaller med det utvalda områdets rand 72. I förekommande fall kan områden inom nämnda

30 andra grupp av områden indelas i underområden 38a, 39b; 48a - 48d. Företrädesvis uppvisar vart och ett av de i nämnda första grupp av områden ingående delområdena 54 - 58 samma form. I det visade exemplet är

områdena kvadratiska. Rektangulära, triangelformade och hexagonala områden kan med fördel användas. Randvillkoren inom denna grupp är även likartade förutom eventuella temperaturdifferenser. Genom nyttjande av formlikhet kan beräkningsrutinerna förenklas eftersom de vis gemensamma beräkningar kan utföras.

Energijämnvikten beräknas principiellt enligt $E^{in}(i) = E^{out}(i) + E^{heat}(i)$, där $E^{in}(i)$ utgör inmatad energi till delområdet $E^{out}(i)$ utgör energiförluster genom avledning och utstrålning från delområdet + $E^{heat}(i)$ utgör upplagrad i delområdet. Den inmatade energin utgörs av dels energi $E^{in(c)}$ vilken instrålats eller inströmmat via värmeledning från omgivningen av det delområde 35 för vilken energijämnvikten beräknas., dels av energi vilken instrålats från strålskanonen 6 $E^{in(s)}$. I det fall att energijämnvikten beräknas innan energi tillförts delområdet 35 gäller sålunda att $E^{in(s)} = 0$. Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen sker åtminstone en första energijämnviktsberäkning för delområdet 35 innan energi tillförts via strålskanonen 6.

I figur 11 visas schematisk en modell på vilken beräkningen av energijämnvikten för delområdet Δ_1 baseras. I detta fall motsvaras delområdet Δ_1 av en del av det utvalda området av pulverlagret i. I detta fall får ekvationen för beräkningen av energijämnvikten utseendet $E^{in}(\Delta_1) = E^{out}(\Delta_1) + E^{heat}(\Delta_1)$, där $E^{in}(\Delta_1)$ utgör inmatad energi till delområdet, $E^{out}(\Delta_1)$ utgör energiförluster genom avledning och utstrålning från delområdet Δ_1 och $E^{heat}(\Delta_1)$ utgör upplagrad i delområdet Δ_1 . Den inmatade energin utgörs av dels energi $E^{in(c)}(\Delta_1)$ vilken instrålats eller inströmmat via värmeledning från omgivningen av delområdet Δ_1 för vilken, dels av energi $E^{in(s)}\Delta_1$ vilken instrålats från strålskanonen 6.

I figur 12 visas schematisk en modell på vilken beräkningen av energijämnvikten för ett andra delområdet Δ_2 inom det utvalda området 35 i lagret i baseras. I detta fall motsvaras delområdet Δ_2 av en del av det utvalda

- området 35 av pulverlagret i vilken ännu inte sammansmälts och vilket angränsar till ett första delområde Δ_1 inom pulverlagret i, där utstrålning eller värmeledning sker från nämnda första till nämnda andra delområde. I detta fall får ekvationen för beräkningen av energijämnvikten utseendet $E^{in}(\Delta_2) =$
- 5 $E^{out}(\Delta_2) + E^{heat}(\Delta_2)$, där $E^{in}(\Delta_2)$ utgör inmatad energi till delområdet $E^{out}(\Delta_2)$ utgör energiförluster genom avledning och utstrålning från delområdet $\Delta_1 + E^{heat}(\Delta_2)$ utgör upplagrad i delområdet Δ_2 . Den inmatade energin utgörs av dels energi $E^{in(c)}(\Delta_2)$ vilken instrålats eller inströmmat via värmeledning från omgivningen av delområdet Δ_1 för vilken, dels av energi $E^{in(s)}(\Delta_2)$ vilken
- 10 instrålats från strålkanon 6. Den via värmeledning tillförda energin $E^{in(c)}(\Delta_2)$ innefattar dels komponenten $E^{in(s)}(\Delta_2, i - 1)$ vilken motsvarar tillförd energi från tidigare lager samt $E^{out}(\Delta_1, \Delta_2)$ vilken motsvarar energi vilken avletts eller utstrålats från det första delområdet Δ_1 och tillförts det andra delområdet Δ_2 .
- 15
- Enligt vad som visas i fig. 13 innefattar anordningen enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen vidare organ 14 för avkänning av ytegenskaper hos ett hos pulverbädden beläget ytlager. Detta organ 14 för avkänning av temperaturfördelningen hos ett hos pulverbädden 5 beläget
- 20 ytlager utgörs företrädesvis av en kamera. I en föredragen utföringsform av uppfinningen nyttjas kameran dels till att uppmäta temperaturfördelningen på ytlagret, dels till att uppmäta förekomsten av ytojämnheter genom den skuggbildning som ytojämnheter ger upphov till. Information om temperaturfördelningen nyttjas dels till att åstadkomma en så jämn
- 25 temperaturfördelning som möjligt över de delar av ytlagret som skall smältas, dels kan information nyttjas för att kontrollera eventuella måttavvikelser mellan genererad tredimensionell produkt och förlaga eftersom temperaturfördelningen återspeglar produktens form. I en föredragen utföringsform av uppfinningen är videokameran monterad på utsidan av det
- 30 hölje 15 som innesluter pulverbädd 5 och strålkanon 6. För att möjliggöra temperaturmätning är höljet försett med ett genomsynligt fönster 16. Pulverbädden 5 är synlig för kameran genom detta fönster.

I en föredragen utföringsform av uppfinningen, vilken visas i figur 14, är
fönstret 16 täckt av en skyddsfilm 17. Skyddsfilmen matas från en
utmatningsenhet 18 till en uppsamlingsenhet 19 varvid filmen successivt
5 bytas ut vilket medför att genomsynligheten kan bibehållas. Skyddsfilmen är
nödvändig eftersom beläggningar uppstår till följd av smältprocessen.

En detaljerad beskrivning avseende generering och korrigering av
körscheman följer nedan i anslutning till beskrivningen av ritningsfigurerna 15
10 —.

I figur 12 visas schematiskt en metod för framställning av tredimensionella
kroppar enligt uppfinningen. Den tredimensionella kroppen bildas genom
successiv sammansmältning av utvalda områden av en pulverbädd, vilka
15 delar motsvarar successiva tvärsnitt hos den tredimensionella kroppen.

I ett första metodsteg 100 sker påläggning av pulverlager på ett arbetsbord.
Påläggning sker genom att ovan nämnda organ 28 distribuerar ett tunt lager
av pulver på arbetsbordet 2.

20 I ett andra metodsteg 110 tillförs energi från en strålskanon 6 enligt ett för
pulverlagret fastställt körschema till ett urvalt område inom pulverlagret varvid
sammansmältning av det enligt nämnda körschema utvalda område av
pulverlagret för bildandet av ett tvärsnitt av nämnda tredimensionella kropp
äger rum. En tredimensionell kropp bildas genom successiv
25 sammansmältning av successivt bildade tvärsnitt ur successivt pålagda
pulverlager. De successiva tvärsnitten är indelade i ett eller flera inre
områden I, var och en uppvisande en rand R, där det inre området I enligt
uppfinningen sammansmälts under ett rörelsemönster för fokalpunkten hos
strålskanonens stråle, vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till
30 nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en
komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen. Enligt
en föredragen utföringsform sammansmälts randen under en huvudsakligen

rätlinjig rörelse hos strålskanonens stråle.

- I en föredragen utföringsform beräknas i ett tredje metodsteg 120 en energijämnvikt för åtminstone det utvalda området som skall sammansmältas inom varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida instrålad energi till det utvalda området från det utvalda områdets omgivning är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området. Beräkningen sker enligt de modeller som redovisats ovan.
- 10 I figur 16 visas schematiskt tillvägagångssättet för generering av primära körscheman. I ett första steg 40 genereras en 3D modell, i exempelvis ett CAD- program, av den produkt som skall tillverkas, alternativt inmatas en färdiggenererad 3D modell av den produkt som skall tillverkas till styrdatoren 8. Därefter genereras i ett andra steg 41 en matris innehållande information om utseenden på tvärsnitt av produkten. I figur 21 visas en modell av en hammare med exempel på tillhörande tvärsnitt 31- 33. Dessa tvärsnitt visas även i fig. 22a- 22c. Tvärsnitten utlägges med en täthet motsvarande tjockleken av de skilda lagren som skall sammansmältas för att bilda den färdiga produkten. Tjockleken kan med fördel varieras mellan de olika lagren.
- 20 Det är bland annat fördelaktigt att göra lagren tunnare i områden där stor variation finns på tvärsnittens utseende mellan näraliggande lager. Vid genereringen av tvärsnitten skapas sålunda en matris innehållande information om utseende på alla tvärsnitt, vilka tillsammans bygger upp den tredimensionella produkten.
- 25 När tvärsnitten väl är genererade genereras i ett tredje steg 42 ett primärt körschema för varje tvärsnitt. Genereringen av primära körscheman baseras dels på formigenkänning av de delar som bygger upp ett tvärsnitt, dels på kunskap om hur körschemat påverkar avsvainingstemperaturen hos lokala delar av ett tvärsnitt. Målsättningen är att skapa ett körschema som medför att avsvainingstemperaturen är så jämn som möjligt hos de delar som sammansmälts innan nästa lager påläggs samtidigt som
- 30

avsvälningstemperaturen skall hållas inom önskat intervall för att reducera risken för uppkomst av krympspänningar i produkten samt reducera storleken på uppkomna krympspänningar i produkten, med deformation av produkten som följd.

5

I första hand genereras ett primärt körschema utgående från formen hos skilda ingående delar av tvärsnittet. Vid genereringen identifieras varje tvärsnitts rand och inre område. I förekommande fall bildas en uppsättning inre områden vilka var och en uppvisar ränder. För de inre områdena

10 genereras enligt uppfinningen ett körschema vilket uppvisar ett rörelsemönster för strålskanonens fokuspunkt vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen enligt vad som ovan angivits. Vid ränderna rör
15 sig strålskanonens fokuspunkt i ett huvudsakligen linjärt rörelsemönster. Detta innebär att strålskanonen följer randens form.

I en föredragen utföringsform av uppfinningen utläggs sålunda primära körscheman baserade på erfarenhet om vilka körscheman som ger en god
20 temperaturfördelning på avsvälningstemperaturen hos tvärsnittet, varvid risken krympspänningar i produkten med deformation av produkten som följd kan reduceras. För detta ändamål finns en uppsättning körscheman för

områden av skilda former lagrade i ett minne. Körscheman enligt
25 uppfinningen är så utformade att strålskanonens fokuspunkt inom inre områden I rör sig i ett rörelsemönster vilket innefattar en huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komposant i vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen. mönster. Förutom denna information kan körscheman innefatta en lista på i vilken ordning en uppsättning inre
30 områden skall bearbetas, information om uppvärmning av skilda områden och information om energitillförsel och svephastighet. I en föredragen

utföringsform uppdateras detta minne allteftersom resultat av korrigeringar av körschemat utvärderas, varvid ett självlärande system erhålles.

I en alternativ utföringsform av uppfinningen matas redan färdiga tvärsnitt, 5 vilka genererats av en fristående dator, in till ett minne i styrdatorn, där nämnda primära körscheman genereras. I detta fall erhålles information direkt till det tredje steget 42 via en extern källa 40a.

I figur 17 visas schematiskt ett förfarande för generering av en 10 tredimensionell kropp vilken innefattar metodsteg för beräkning av energijämnvikt för ett lager. I ett första metodsteg 130 sker ett fastställande av parametrar på vilka en energijämnviktsberäkning baseras. I ett andra metodsteg 140 sker en beräkning av energijämnvikten för ett åtminstone det utvalda området 35. Beräkningen sker enligt den tidigare redovisade 15 metoden.

I ett tredje metodsteg 150 sker en uppdatering av körschemat i beroende av den beräknade energijämnvikten. Om energijämnvikten resulterar att 20 tillräckligt värmeenergi finns lagrad i det utvalda området för att bibehålla önskad arbetstemperatur sker ingen extra energitillförsel. Om energijämnvikten resulterar att tillräckligt värmeenergi inte finns lagrad i det utvalda området för att bibehålla önskad arbetstemperatur sker enligt en utföringsform av uppfinningen extra energitillförsel i form av förvärmning av det utvalda området innan sammansmältning sker. Denna förvärmning kan 25 ske genom att strålskanonen sveps mycket snabbt över området eller att strålskanonen sveper över området med lägre effekt än normalt alternativt en kombination av bådaddera. Förvärmningen äger rum i ett fjärde metodsteg 160.

I ett femte metodsteg 170 sker sammansmältningen genom att strålskanonen 30 sveps över det utvalda området.

- I figur 18 visas schematiskt en utföringsform av uppfinningen vilken i förekommande fall utnyttjar de ovan beskrivna metoderna för generering och korrigering av körscheman. I ett första metodsteg 180 identifieras ett eller flera av inre områden I hos det utvalda området. I ett andra metodsteg 190
- 5 identifieras den eller de till nämnda inre områden tillhörande randen eller ränderna R vilka var och en omsluter nämnda inre område. I ett tredje metodsteg 200 sammansmälts nämnda inre områden I under en delvis överlappande cirkelformad rörelse hos den av strålskanonen avgivna strålen. Under ett fjärde metodsteg 210 sammansmälts nämnda ränder under en
- 10 rätlinjig rörelse hos strålen. Korrigeringen är av mindre magnitud för processer vilka nyttjar den uppfinningsmässiga metoden med ett rörelsemönster uppvisande en störterm samt för processer där en energijämnviktsberäkning utförs. En korrigering kan ändock nyttjas för att ytterligare förbättra slutresultatet.
- 15 Enligt en utföringsform av uppfinningen är körschemat anordnat att konsekutivt sammansmälta pulvret inom ett område i taget inom nämnda inre områden.
- 20 Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen är styrdatorn anordnad att indela ytan inom varje pulverlager i en uppsättning avskilda områden, varvid nämnda uppsättning avskilda områden innefattar en första grupp områden vilka ligger helt inom nämnda utvalda områdes rand samt en andra grupp områden vars ränder delvis sammanfaller med nämnda utvalda områdes rand.
- 25 I förekommande fall kan områden inom nämnda andra grupp av områden indelas i underområden. Företrädesvis uppvisar vart och ett av de i nämnda första grupp av områden ingående delområdena samma form. I det visade exemplet är områdena kvadratiska. Rektangulära, triangelformade och hexagonala områden kan med fördel användas. Randvillkoren inom denna
- 30 grupp är även likartade förutom eventuella temperaturdifferenser. Genom nyttjande av formlikhet kan beräkningsrutinerna förenklas eftersom dels gemensamma beräkningar kan utföras.

Styrdatorn är vidare anordnad att tillse att nämnda inre områden hos en uppsättning områden inom nämnda första grupp av områden sammansmälts under en delvis överlappande cirkelformad rörelse hos strålskanonens stråle.

- 5 I en utföringsform av uppfinningen sker sammansmältningen hos de inre områdena i nämnda andra grupp av områden med en fokalpunktsrörelse innefattande en störterm enligt vad som ovan beskrivits. I en alternativ utföringsform av uppfinningen sker sammansmältningen inom de inre områdena i nämnda andra grupp av områden med en huvudsakligen rätlinjig
10 rörelse.

- Enligt en föredragen utföringsform av uppfinningen nyttjas vid ovan beskrivna utföringsformer avseende indelning av den utvalda ytan i mindre delytor den ovan beskrivna beräkningen av energijämnvikt för att styra körschemat med
15 avseende på kalibrering av strålens effekt och tillförsel av energi för uppvärmning av pulverbädden innan slutlig sammansmältning sker.

- I figur 19 visas schematiskt ett förfarande innefattande korrigering av körscheman med hjälp av information inhämtad från en kamera vilken
20 uppmäter temperaturfördelningen över pulverbäddens yta. Enligt förfarandet styrs strålen från strålskanonen över pulverbädden för att generera ett tvärsnitt av en produkt. I ett första steg 50 påbörjas styrning av strålen över pulverbädden enligt det i steg 42 definierade primära körschemat. I nästa steg 51 mäts temperaturfördelningen på pulverbäddens ytlager av kameran.
25 Av den uppmätta temperaturfördelningen genereras därefter en temperaturfördelningsmatris, $T_{ij\text{-uppmätt}}$, där temperaturen på små delområden av pulverbäddens ytlager lagras. När matrisen är generad jämförs varje temperaturvärde $T_{ij\text{-uppmätt}}$ i matrisen med önskat värde hos en börvärdesmatris $T_{ij\text{-börvärde}}$. Pulverbäddens ytlager kan grovt indelas i tre
30 kategorier. För det första, områden där sammansmältning pågår genom bearbetning av strålskanonen. I dessa områden är maximala smälttemperatur $T_{ij\text{-max}}$ av intresse. För det andra, områden som redan sammansmälts och

- 5 som därigenom svalnar. I dessa områden är en minimal tillåten avsvälningstemperatur $T_{ij\text{-avsvälning-min}}$ av intresse eftersom alltför kall avsvälningstemperatur ger upphov till spänningar och därigenom deformationer av ytlagret. För det tredje, områden som inte bearbetats av strålskanonen. I dessa områden är bäddtemperaturen $T_{ij\text{-bädd}}$ av intresse. Det är även möjligt att temperaturen jämförs enbart i bearbetade områden, varvid $T_{ij\text{-bädd}}$ inte lagras och/eller kontrolleras.
- 10 I ett tredje steg 52 undersöks om $T_{ij\text{-uppmätt}}$ avviker från önskat värde $T_{ij\text{-börvärde}}$ och om avvikelsen är större än tillåtna gränsvärden. Gränsvärden $\Delta T_{ij\text{-max}}$, $\Delta T_{ij\text{-avsvälning}}$ och $\Delta T_{ij\text{-bädd}}$ tillhörande de tre olika kategorierna finns lagrade i styrdatorn 8. Det är även möjligt att bäddtemperaturen inte kontrolleras. I detta fall lagras inte det tillhörande gränsvärdet. Om avvikelsen mellan $T_{ij\text{-uppmätt}}$ och $T_{ij\text{-börvärde}}$ inte
- 15 överstiger detta gränsvärde undersöks i ett fjärde steg 53 huruvida ytlagret är färdigbearbetat. Om så inte är fallet fortsätter körningen enligt det gällande körschemat varvid ovan nämnda metodsteg 50 – 53 genomlöpes ytterligare en gång.
- 20 Om avvikelsen mellan $T_{ij\text{-uppmätt}}$ och $T_{ij\text{-börvärde}}$ överstiger något av nämnda gränsvärden sker en korrigering av körschemat 42 i ett femte steg. Nämnda korrigering utförs i en föredragen utföringsform enligt det schema som visas i figur 20.
- 25 I en föredragen utföringsform av uppfinningen utlägges ett nytt pulverlager först efter färdigställandet av varje lager, varvid produkten uppbygges genom successiva sammansmältningar av pulverlager tills det att produkten är färdig. I detta fall påbörjas, efter ett sjätte steg 55, ett nytt lager, om produkten i sin helhet inte är färdig, när det i det fjärde steget 53
- 30 konstaterats att körschemat för ett lager är avslutat.

Korrigeringen av körschemat innefattar i en föredragen utföringsform följande metodsteg:

- I ett första steg 56 jämförs T_{ij-max} med $T_{ij-max-börvärde}$. Om T_{ij-max} avviker från $T_{ij-max-börvärde}$ överstigande ΔT_{ij-max} kalibreras i ett steg 56a energitillförseln till pulverlagret genom att antingen ändra strålens effekt eller ändra strålens svephastighet.
- I ett andra steg 58 jämförs $T_{ij-avsvainig}$ med $T_{ij-avsvainig-börvärde}$. Om $T_{ij-avsvainig}$ avviker från $T_{ij-avsvainig-börvärde}$ överstigande $\Delta T_{ij-avsvainig}$ ändras strålens körschema i ett steg 58a. Det finns flera sätt att ändra körschemat hos en stråle. Ett sätt att ändra körschemat är att tillåta att strålen återuppvärmer områden innan de avsvainat för mycket. Strålkanonen kan då svepa över redan sammansmälta områden med lägre energiintensitet och/eller högre svephastighet.
- I ett tredje steg 60 undersöks huruvida $T_{ij-bädd}$ avviker från $T_{ij-bädd-börvärde}$. Om avvikelsern är större än $\Delta T_{ij-bädd}$ kan i en utföringsform av uppfinningen bäddens temperatur korrigeras i ett steg 60a, exempelvis genom att strålen förmås svepa över bädden för tillförsel av energi. Det är även möjligt att till anordningen ansluta separat bädduppvärmningsutrustning.
- Det är även möjligt att en storlekskontroll av det föremål som skall tillverkas görs genom den värmekamera som installerats i anordningen. Enligt vad som ovan beskrivits uppmäts bädden och de delar som sammansmälts. Den uppmätta värmefördelningen avspeglar helt och hållet objektets form i ett snitt av den tredimensionella kropp som skall skapas. En kontroll av föremålets dimensioner kan därigenom göras i ett fjärde steg 62 och återkoppling av X-Y avlänkning av strålkanonens stråle kan därigenom utföras. Denna kontrol utförs i en föredragen utföringsform av uppfinningen i ett steg 62a där avvikelsern mellan mått på tvärsnittet görs och om avvikelsern är större än tillåten, strålkanonens X-Y avlänkning korrigeras.

Dessutom kan insignaler från kameran nyttjas till att identifiera förekomsten ytojämnheter, exempelvis i form av en svetsloppa. När koordinaterna för en ytojämnhet har identifierats kan körschemat uppdateras så att strålskanonen beordras till identifierad koordinat för att smälta ned ytojämnheten.

5

Uppfinningen är inte begränsad till det ovan beskrivna utföringsexemplet, exempelvis kan strålskanonen utgöras av en laser, varvid avlänkingsorganen utgörs av styrbara speglar och eller linser.

- 10 Uppfinningen kan vidare utnyttjas i en anordning för framställande av en tredimensionell produkt genom energiöverföring från en energikälla till ett produktråmaterial, vilken anordning innefattar ett arbetsbord på vilken nämnda tredimensionella produkt skall uppbyggas, en dispenser vilken är anordnad att lägga ut ett tunt lager av produktråmaterial på arbetsbordet för
- 15 bildande av en produktbädd, ett organ för avgivande av energi till valda områden av produktbäddens yta varvid en fasövergång hos produktråmaterialet medges för bildande av ett fast tvärsnitt inom nämnda område och en styrdator vilken hanterar ett minne i vilket information om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns lagrad, vilka
- 20 tvärsnitt bygger upp den tredimensionella produkten, där styrdatorn är ämnad att styra nämnda organ för avgivande av energi så att energi tillförs till nämnda valda områden, varvid nämnda tredimensionella produkt bildas genom successiv sammanbindning av successivt bildade tvärsnitt ur av dispensern successivt pålagt produktråmaterial.

25

I detta fall är utföringsformen inte begränsad till sammansmältning av pulver genom att en strålskanon bestrålar ytan hos en pulverbädd.

Produktråmaterialet kan utgöras av varje material vilka efter en fasövergång bildar en fast kropp, exempelvis stelning efter smältning eller härdning. Det

- 30 energiavgivande organet kan utgöras en elektronkanon, en laser vilka styrs överarbetsytan alternativt av ett energiavgivande organ vilket kan projicera ett tvärsnitt direkt på produktbädden.

De ovan beskrivna utföringsform kan i övrigt utrustas med alla de särdrag som finns beskrivna i förhållande till den tidigare beskrivna utföringsformen.

1
2
3
4
5
6
7
8
9

PATENTKRAV

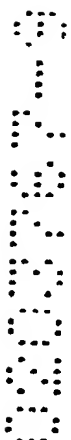
- 1 Metod för framställning av tredimensionella kroppar genom
 successiv sammansmältning av utvalda områden av en
5 pulverbädd, vilka delar motsvarar successiva tvärsnitt hos den
 tredimensionella kroppen, vilken metod innefattar följande
 metodsteg:
 påläggning av pulverlager på ett arbetsbord,
 tillförande av energi från en strålskanon enligt ett för pulverlagret
10 fastställt körschema till nämnda utvalda område inom
 pulverlagret, sammansmältning av det enligt nämnda körschema
 utvalda området av pulverlagret för bildandet av ett tvärsnitt av
 nämnda tredimensionella kropp, varvid en tredimensionell kropp
 bildas genom successiv sammansmältning av successivt bildade
15 tvärsnitt ur successivt pålagda pulverlager
 k ä n n e t e c k n a d a v att nämnda utvalda område indelas i
 ett eller flera inre områden I, var och en uppvisande en rand R,
 där det inre området I sammansmälts under ett rörelsemönster
20 för fokuspunkten hos strålskanonens stråle, vilket innefattar en
 huvudsaklig rörelseriktning och en till nämnda huvudsakliga
 rörelseriktning adderad störterm vilken uppvisar en komponent i
 vinkelrät riktning mot den huvudsakliga rörelseriktningen.
- 2 Metod enligt krav 1, kännetecknad av att störtermen växlar
25 riktning och uppvisar ett tidsmedelvärde motsvarande en
 nollavdrift från den huvudsakliga rörelseriktningen.
- 3 Metod enligt krav 1, kännetecknad av att nämnda störterm
 uppvisar en komponent vilken är parallell med den huvudsakliga
30 rörelseriktningen.

- 4 Metod enligt krav 3, kännetecknad av att rörelsemönstret motsvarar en delvis överlappande spiralformad rörelse hos strålskanonens stråle.
- 5 5 Metod enligt något av kraven 1 - 4, kännetecknad av att och nämnda rand sammansmälts under en huvudsakligen rätlinjig rörelse hos strålskanonens stråle.
- 10 6 Metod enligt något av kraven 1 - 5, kännetecknad av att en energijämnvikt beräknas för åtminstone nämnda utvalda område inom varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida instrålad energi till det utvalda området från det utvalda områdets omgivning är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området.
- 15 7 Metod enligt krav 6, kännetecknad av att, förutom nämnda energi för sammansmältning av det utvalda området, energi för uppvärmning av det utvalda området tillförs i det fall att beräkningen av energijämnvikt resulterar i att tillräcklig energi för bibehållande av avsedd arbetstemperatur hos det utvalda området inte föreligger, varvid bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området uppnås.
- 20 8 Metod enligt krav 6 eller 7, kännetecknad av att energijämnvikten för varje pulverlager beräknas enligt $E^{in}(i) = E^{out}(i) + E^{heat}(i)$, där $E^{in}(i)$ utgör inmatad energi till det utvalda området $E^{out}(i)$ utgör energiförluster genom avledning och utstrålning från det utvalda området + $E^{heat}(i)$ utgör upplagrad i det utvalda området.
- 25 9 Anordning för framställande av en tredimensionell produkt, vilken anordning innefattar ett arbetsbord på vilken nämnda tredimensionella produkt skall uppbyggas, en pulverdispenser
- 30

- vilken är anordnad att lägga ut ett tunt lager av pulver på arbetsbordet för bildande av en pulverbädd, en strålskanon för avgivande av energi till pulvret varvid sammansmältning av pulvret sker, organ för styrning av den av strålskanonen avgivna strålen över nämnda pulverbädd för bildandet av ett tvärsnitt av nämnda tredimensionella produkt genom sammansmältning av delar av nämnda pulverbädd och en styrdator i vilken information om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns lagrad, vilka tvärsnitt bygger upp den tredimensionella produkten, där styrdatorn är ämnad att styra nämnda organ för styrning av strålskanonen över pulverbädden enligt ett körschema bildande ett tvärsnitt hos nämnda tredimensionella kropp, varvid nämnda tredimensionella produkt bildas genom successiv sammansmältning av successivt bildade tvärsnitt ur av pulverdispensern,
- k ä n n e t e c k n a d a v att styrdatorn är anordnad att indela nämnda utvalda område i ett eller flera inre I områden vilka var och en uppvisar en rand R, körschemat är anordnat att
- 20 10 Anordning enligt något av kraven 8 - 12, kännetecknad av att styrdatorn vidare är anordnad att beräkna en energijämnvikt för åtminstone det utvalda området inom varje pulverlager, varvid vid beräkningen fastställs huruvida instrålad energi till det utvalda området från delområdets omgivning är tillräckligt för att bibehålla en bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området.
- 25
- 11 Anordning enligt krav 13, kännetecknad av att styrdatorn är anordnad att styra nämnda körschema för tillförsel av, förutom nämnda energi för sammansmältning av pulverlager, energi för uppvärmning av pulverlagret i det fall att beräkningen av energijämnvikt resulterar i att körschemat ej ger tillräcklig energi för bibehållande av avsedd arbetstemperatur hos det utvalda
- 30

området, varvid bestämd arbetstemperatur hos det utvalda området bibehålles.

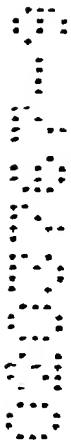
- 12
5 Anordning enligt krav 13 eller 14, kännetecknad av att styrdatom är anordnad att beräkna energijämnvikten för varje pulverlager enligt $E^{in}(i) = E^{out}(i) + E^{heat}(i)$, där $E^{in}(i)$ utgör inmatad energi till det utvalda området $E^{out}(i)$ utgör energiförluster genom avledning och utstrålning från det utvalda området + $E^{heat}(i)$ utgör upplagrad energi i det utvalda området.
- 10
13 Anordning enligt något av kraven 8 – 15, kännetecknad av att anordningen vidare innefattar organ för avkänning av temperaturfördelningen hos ett hos pulverbädden beläget ytlager.



SAMMANDRAG

5 Anordning för framställande av en tredimensionell produkt, vilken
anordning innefattar ett arbetsbord på vilken nämnda
tredimensionella produkt skall uppbyggas, en pulverdispenser
vilken är anordnad att lägga ut ett tunt lager av pulver på
arbetsbordet för bildande av en pulverbädd, en strålskanon för
avgivande av energi till pulvret varvid sammansmältning av
10 pulvret sker, organ för styrning av den av strålskanonen avgivna
strålen över nämnda pulverbädd för bildandet av ett tvärsnitt av
nämnda tredimensionella produkt genom sammansmältning av
delar av nämnda pulverbädd och en styrdator i vilken information
om successiva tvärsnitt av den tredimensionella produkten finns
lagrad, vilka tvärsnitt bygger upp den tredimensionella
15 produkten, där styrdatorn är ämnad att styra nämnda organ för
styrning av strålskanonen över pulverbädden enligt ett körschema
bildande ett tvärsnitt hos nämnda tredimensionella kropp, varvid
nämnda tredimensionella produkt bildas genom successiv
sammansmältning av successivt bildade tvärsnitt ur av
20 pulverdispensern samt metod för framställande av
tredimensionell produkt nyttjande en sådan anordning.

Fig. 1



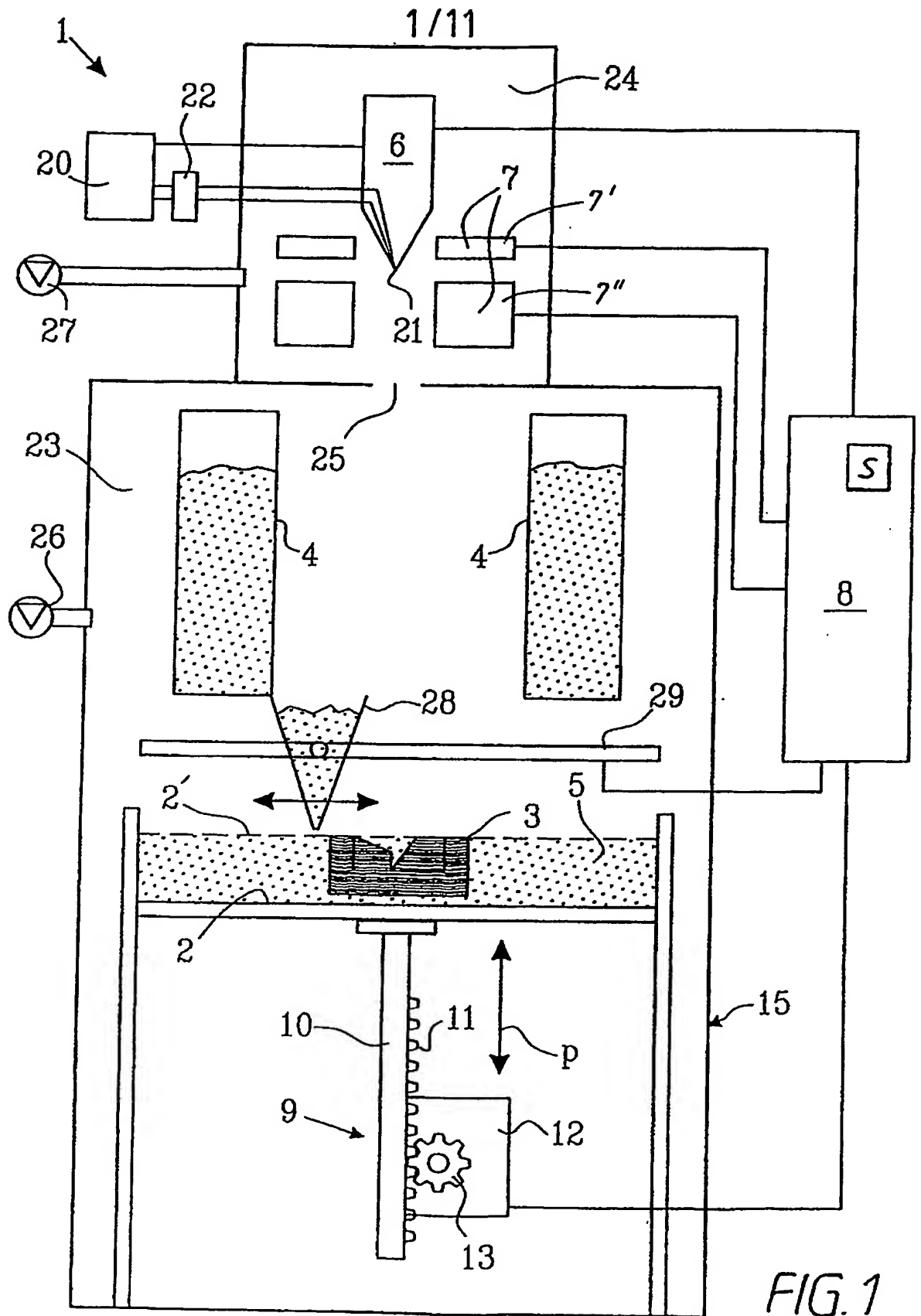


FIG. 1

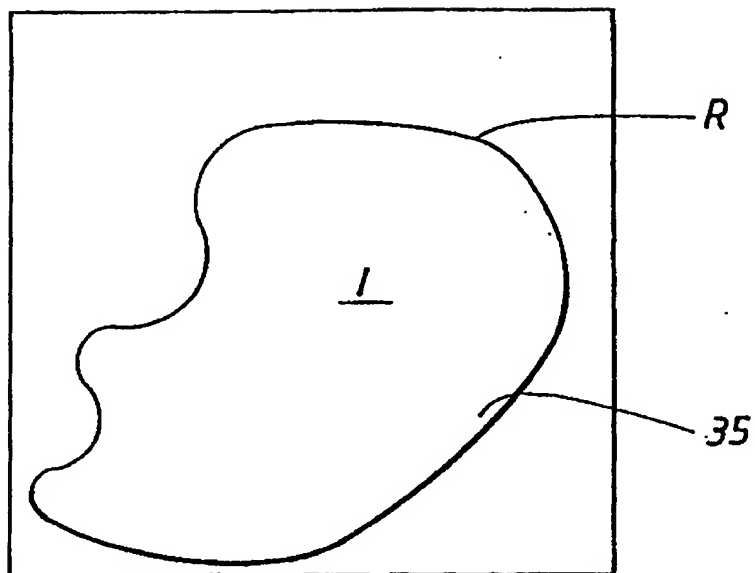


FIG. 2

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
84

3/11

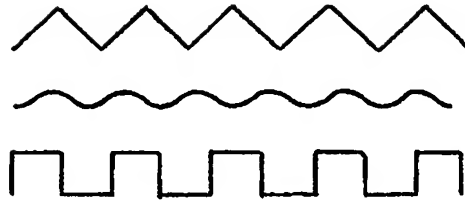


FIG. 3

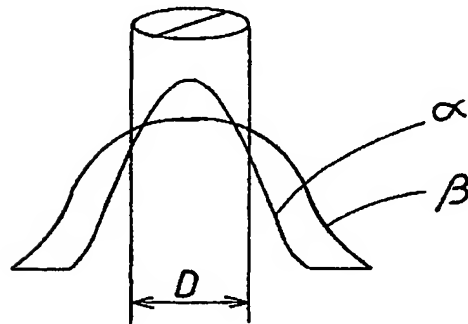


FIG. 4

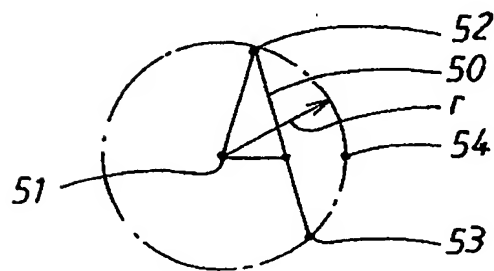


FIG. 5

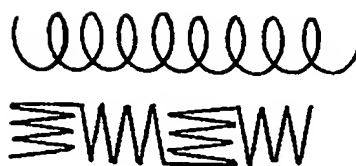


FIG. 6

20160808

4/11

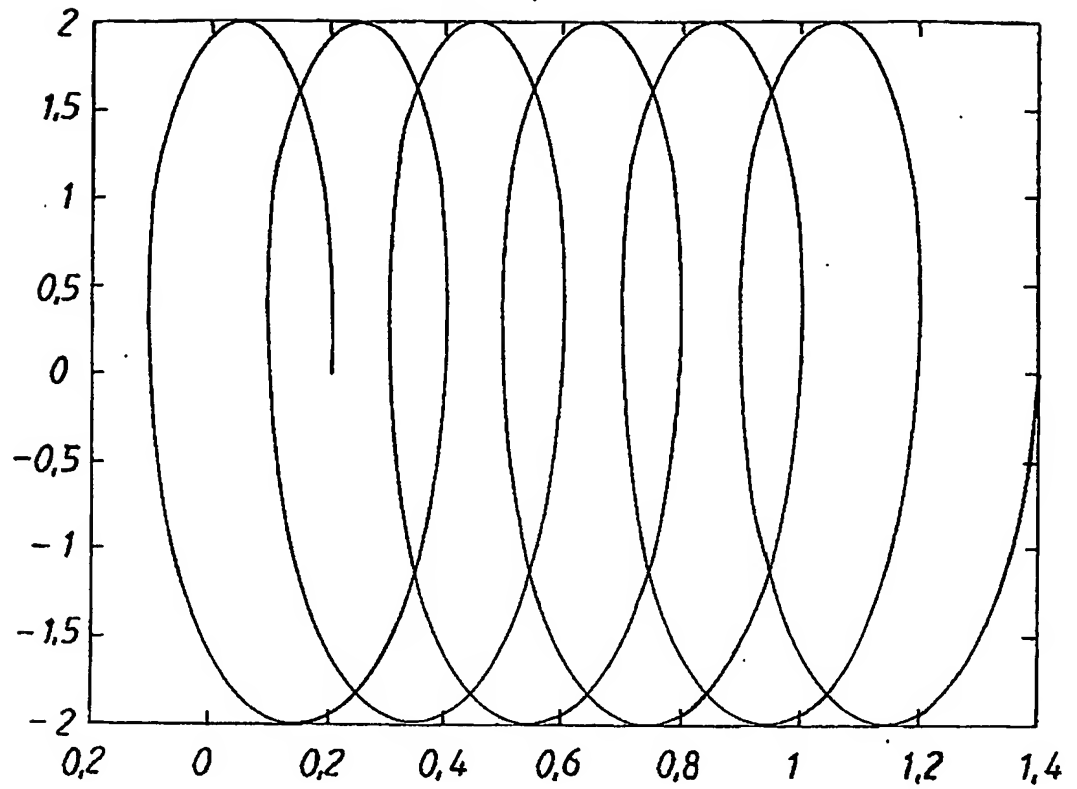


FIG. 7

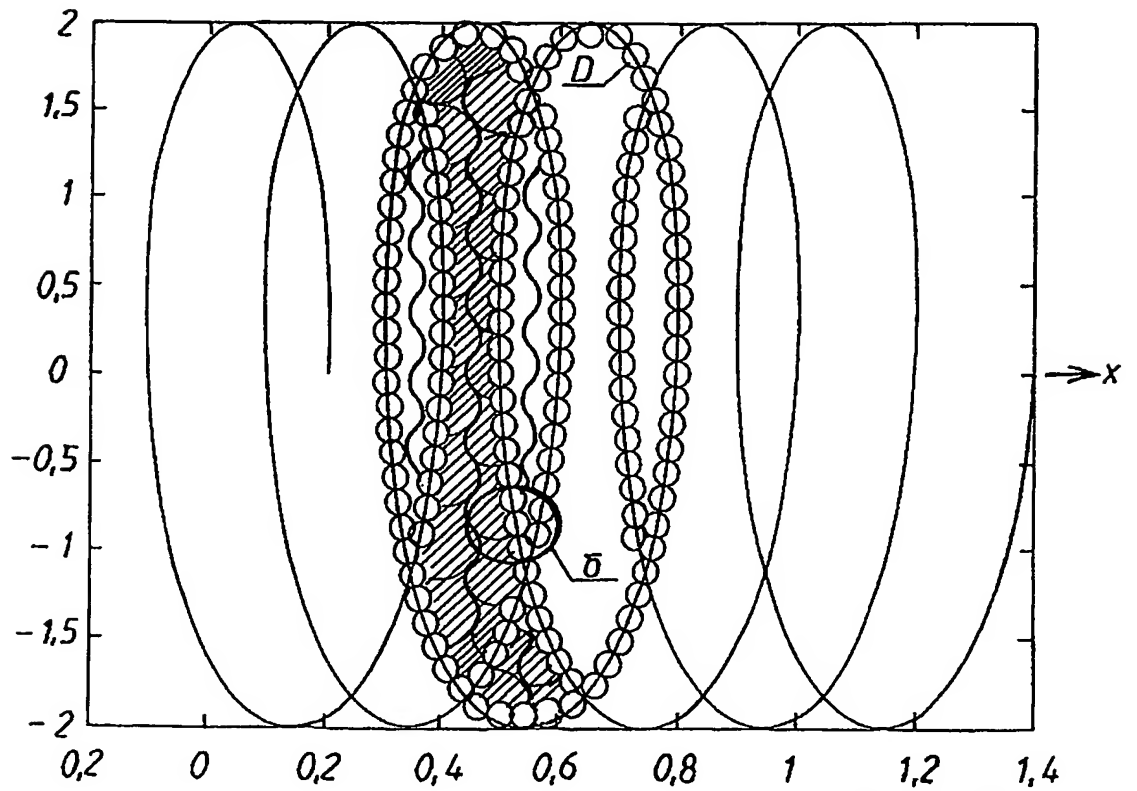


FIG. 8

5/11

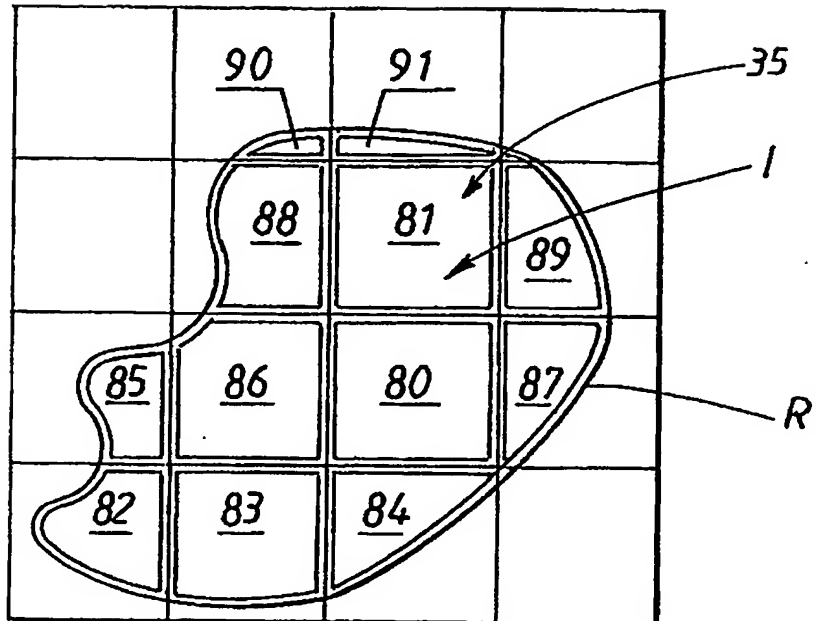


FIG. 9

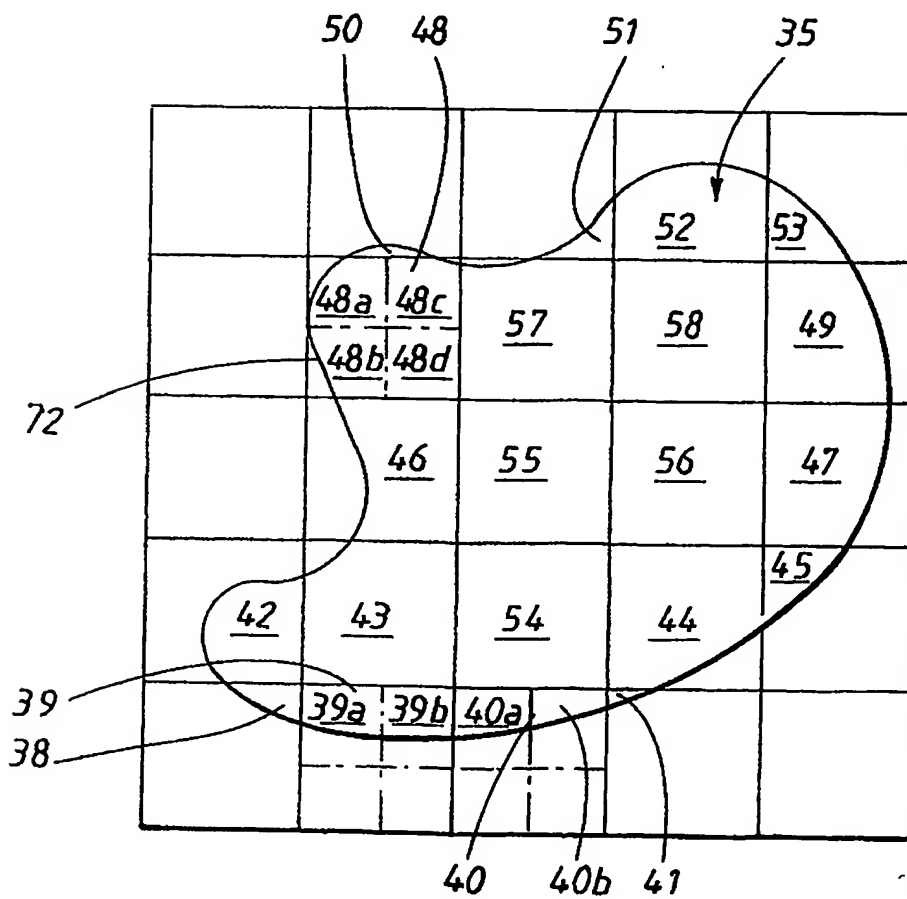


FIG. 9a

6/11

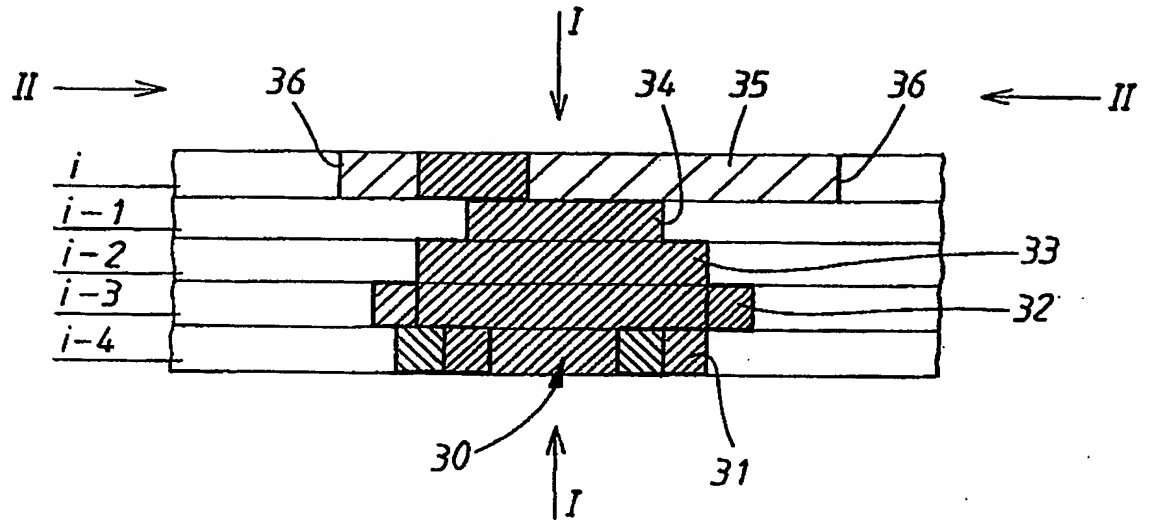


FIG. 10

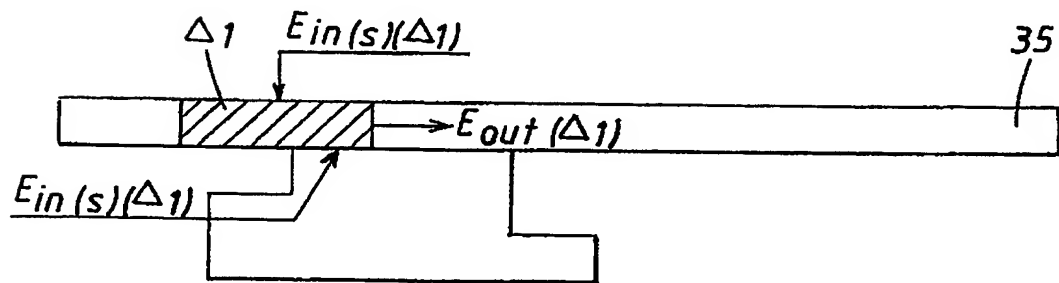


FIG. 11

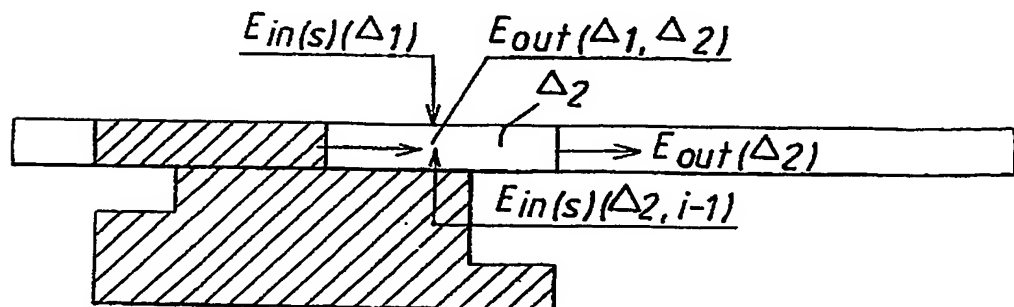


FIG. 12

7/11

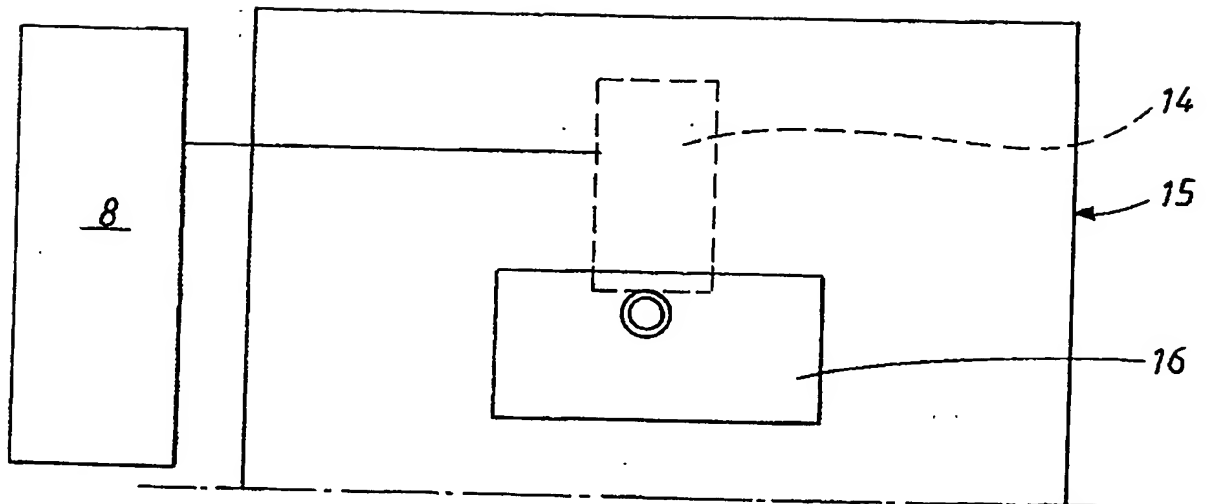


FIG. 13

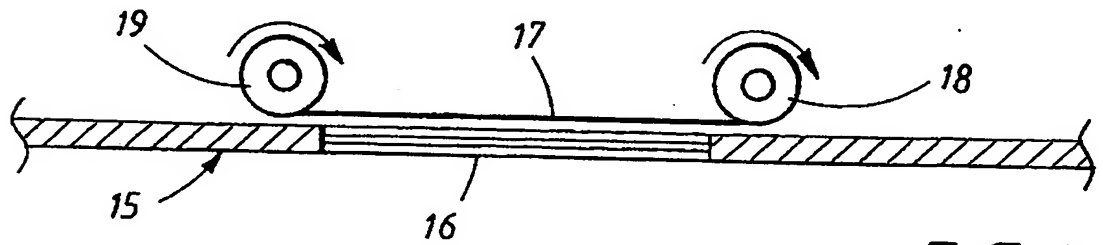


FIG. 14

8/11

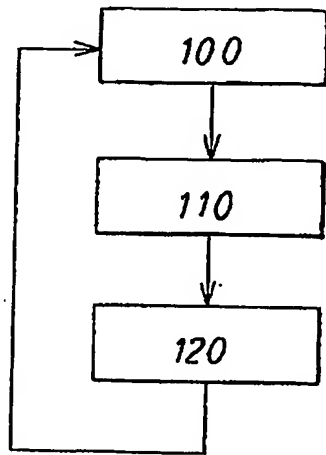


FIG. 15

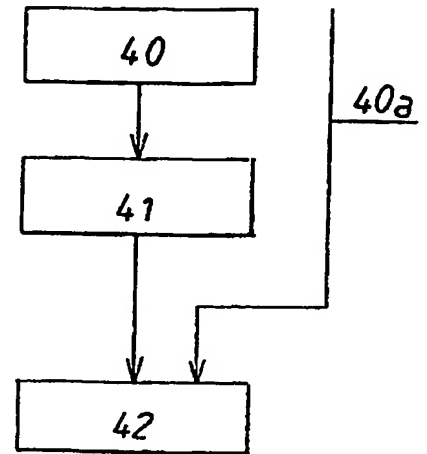


FIG. 16

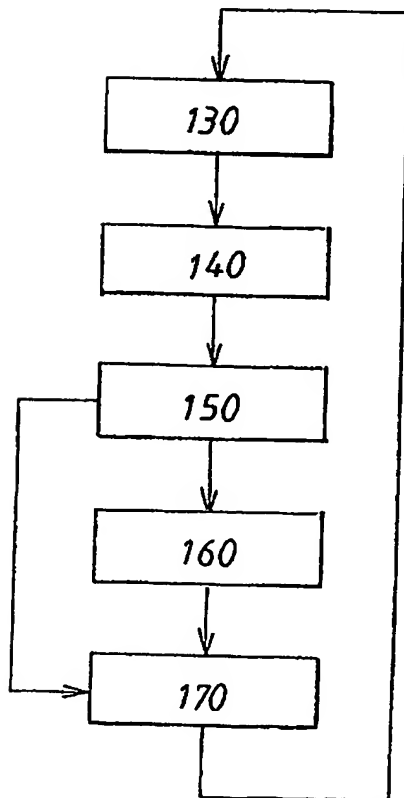


FIG. 17

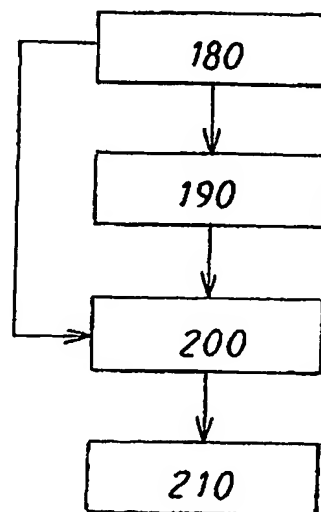


FIG. 18

9/11

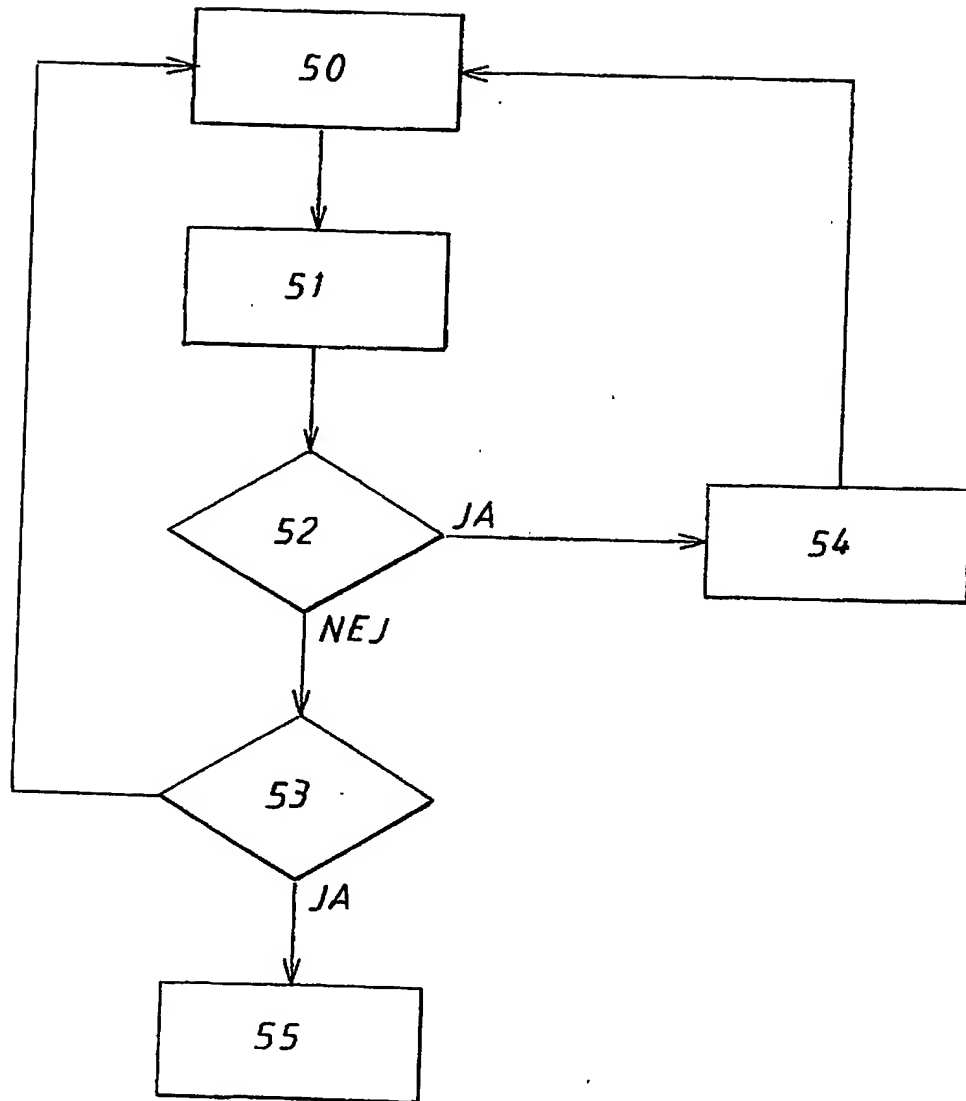


FIG. 19

10/11

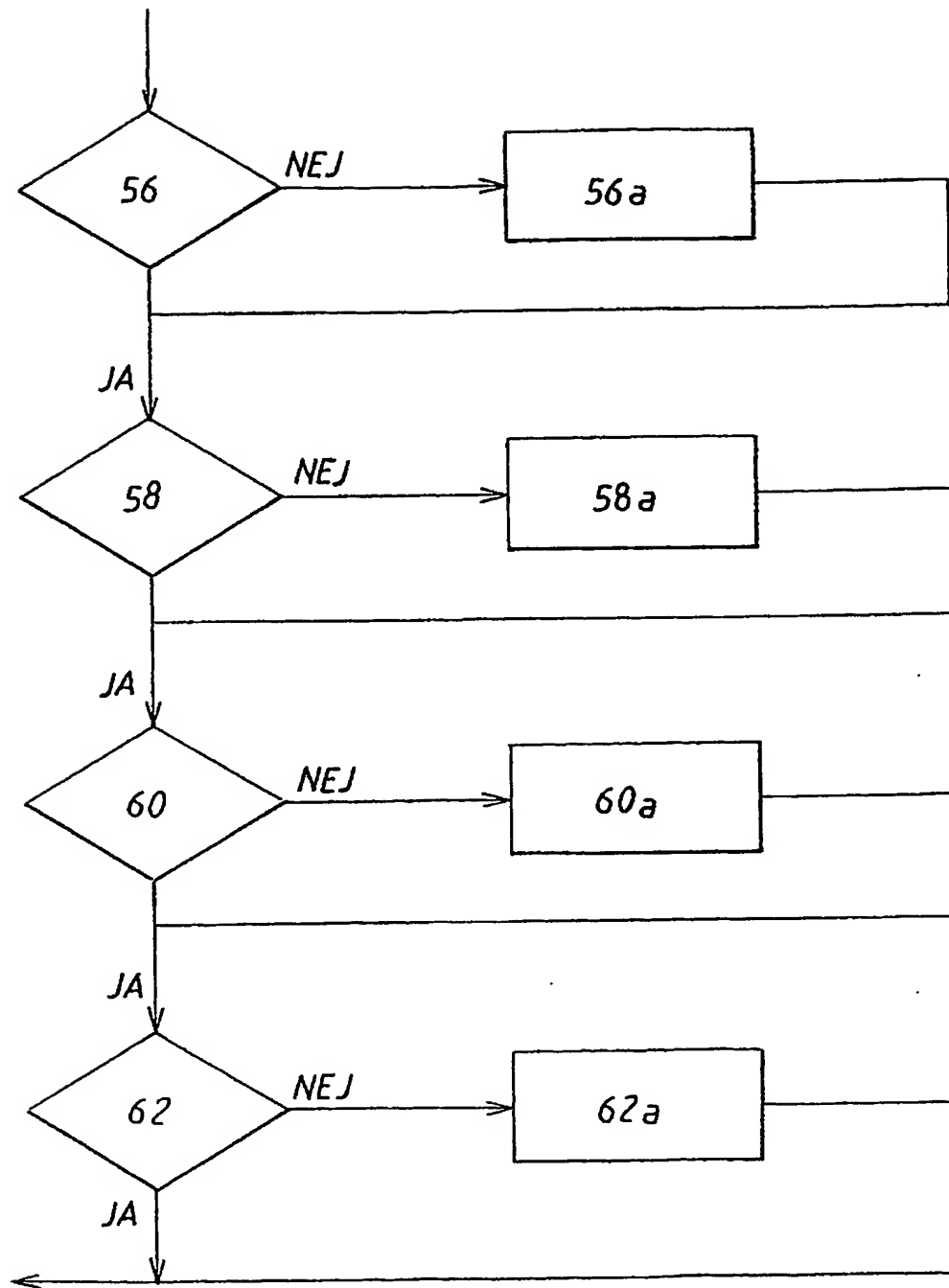


FIG. 20

11 / 11

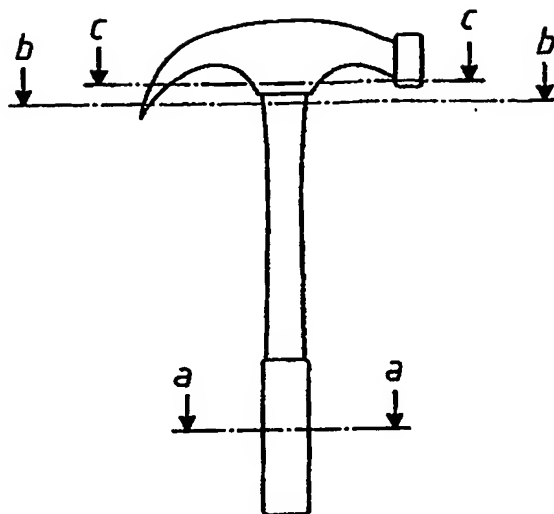


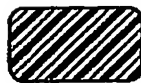
FIG. 21



a-a



b-b



c-c



FIG. 22